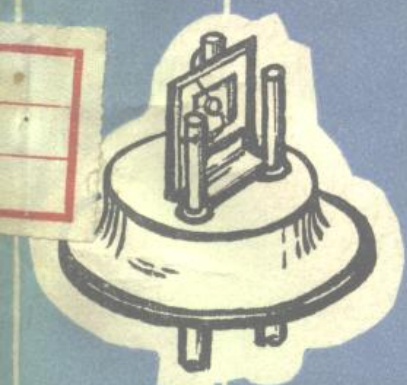


半导体手册
第4编



晶体二极管和晶体三极管



科学出版社

73.67
5

《半导体手册》第4編

晶体二极管和晶体三极管

《半导体手册》翻译组译

科学出版社

1971

《半导体手册》第4编
晶体二极管和晶体三极管

《半导体手册》翻译组译

*

科学出版社出版

北京西直门外三里河路2号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1971年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1971年9月第一次印刷 印张：5

字数：111,000

统一书号：15031·278

本社书号：3631·15—7

定价：0.38元

毛主席语录

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。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

译 者 的 话

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16编。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以删

节和校正。

本书在译校过程中,很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助,并提出不少宝贵意见,我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制,在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误,又由于我们毛泽东思想学习的不够好,所以对原书中的其他错误观点及存在的问题,未能指出和很好的批判,恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 晶体三极管	(1)
1.1 点接触型晶体三极管	(1)
1.2 面结型晶体三极管	(4)
1.2.1 生长结系列	(4)
1.2.2 合金结系列	(15)
1.2.3 扩散结系列	(34)
1.3 其他类型的晶体管	(61)
1.3.1 场效应型晶体管	(61)
1.3.2 空间电荷管	(72)
1.3.3 其他类型的晶体管	(76)
第二章 晶体二极管和整流器	(80)
2.1 氧化亚铜整流器	(80)
2.2 硒整流器	(81)
2.3 点接触型晶体二极管	(84)
2.3.1 一般点接触型晶体二极管	(85)
2.3.2 微波晶体二极管	(91)
2.4 金键型晶体二极管	(99)
2.5 面结型晶体二极管	(101)
2.5.1 信号用面结型晶体二极管	(102)
2.5.2 整流器	(105)
2.6 稳压二极管	(108)
2.7 晶体二极管电容器	(112)
2.7.1 硅可变电容器	(113)
2.7.2 参量二极管	(115)

2.8 其他类型的晶体二极管	(119)
2.8.1 辐射计数器二极管	(119)
第三章 负阻元件	(122)
3.1 单结晶体管	(122)
3.2 四层二极管	(123)
3.3 pnpn 三端器件	(126)
3.3.1 硅 pnpn 三端器件	(126)
3.3.2 半导体开关元件	(127)
3.3.3 宽基极 pnpn 开关	(128)
3.3.4 其他半导体开关	(129)
3.4 隧道二极管	(132)
3.4.1 静态特性、等效电路	(132)
3.4.2 二极管的制作	(133)
3.4.3 隧道二极管的各种特性	(135)
3.4.4 其他	(137)
3.5 其他	(138)
3.5.1 电荷层晶体管	(138)
3.5.2 负阻器件	(139)
3.5.3 闸流管式晶体三极管	(141)
3.5.4 戴士南晶体管(开关用)	(142)
3.5.5 合金结雪崩晶体管	(143)
3.5.6 电子“雪崩”注入二极管	(144)
3.5.7 半导体脉冲转移元件	(145)
3.5.8 雪崩复合低位开关	(146)
参考资料	(148)

第一章 晶体三极管

1.1 点接触型晶体三极管

晶体三极管的结构最初是点接触型。图 4·1 是点接触型

晶体三极管结构示例。这种晶体管称为 A 型晶体三极管。制作方法如下：把 n 型锗锭切成约 0.5 毫米厚的薄片，背面镀锡，用金刚刀切成约 1 毫米见方的小片。把这种锗片焊在黄铜底盘上，用化学药品对锗片表面进行腐蚀处理，然后压进作基极电极的金属圆筒。从酚醛塑料塞中引出两根引线制成发射极和集电极的引线。同锗片的接触部分，是用直径 0.125 毫米的铍铜丝(发射极材料)和磷青铜丝(集电极材料)制成，把它的尖端磨成楔形，焊接在引线上，并用夹具整形，作成图 4.2 所示的形状。再调整触针尖端的间隔，使之保持 0.01 毫米左右，然后压进圆筒的另一端，使触针尖端接触晶体表面。这样装好后，再用聚异丁烯等填料把圆筒内填满，以提高机械冲击强度，并使晶体表面不受湿度影响。在这种状态下仍得不到良好特性，还须要进行冶金。冶金方法

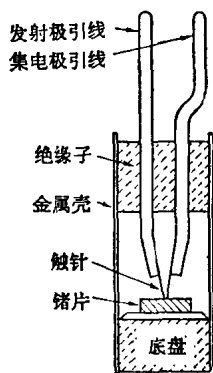


图 4·1 A 型点接触型晶体三极管

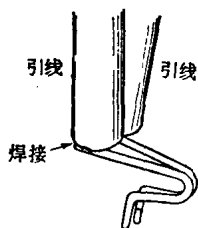


图 4·2 触针构造示例

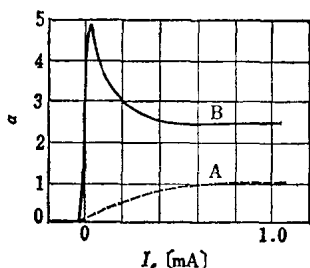
如下：通过集电极端沿相反方向通以电流脉冲，对接触部分进行加热。一般是利用电容器放电脉冲，用示波器检查在每一脉冲下晶体的特性，要逐渐加强脉冲，直到获得良好特性为止。在此期间，一般是使发射极保持正向偏压。

[1] 电流放大机构

晶体三极管的电流放大系数 α 可用下式表示：

$$\alpha = \gamma \beta \alpha^* \quad (4.1)$$

式中 γ 是发射极空穴注射效率， β 是空穴由发射极到集电极的输运系数， α^* 是集电极的收集效率。点接触型晶体三极管



A: 治成前 B: 治成后

图 4.3 α 的电流特性

的 α 如图 4.3 所示，它比面结合型晶体三极管的 $\alpha \approx 1$ 大。据说这是因为 α^* 大，至于 α^* 大的原因，说法不一，有的根据电导调制现象所作的解释^[1]，即根据电导调制，认为 α^* 可表为 $\alpha^* = (1 + b)$ ，如果应用锗的迁移率之比 $b(\mu_n/\mu_p) \approx 2.1$ ，则 α 就可能增大到 3.1。但是，晶

体三极管经过治成处理后， α 有时竟达到 20 以上，对于这种现象便根本无法解释。关于这个问题，已经提出了两种理论^[2]。

(a) 陷阱理论 认为在集电极触针下面有一个陷阱中心，能够俘获由发射极注入的空穴。这时空穴不能移动，所以在表观上空穴迁移率 μ_p 要减小。另一方面，电子不被陷阱俘获，所以 α^* 有可能大于 3.1。

(b) 钩式理论 由于治成处理时温度上升，如图 4.4 所示，在集电极触针的正下面会形成 P 型和 n 型的薄层，这个

pn 钩的放大机构能使 α^* 特别增大。

【2】频率特性 频率极限主要取决于载流子在发射极和集电极间的渡越时间。渡越时间 τ 可用下式表示：

$$\tau = S^3 \sigma / \mu I_e, \quad (4.2)$$

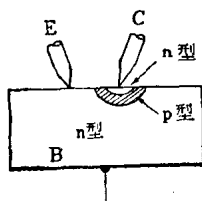


图 4.4 A 型晶体三极管集电极的钩式结构

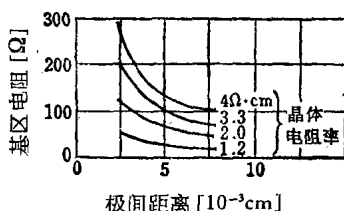


图 4.5 基区电阻与电极间距离的特性关系曲线（以晶体电阻率为参变数）

式中 S 是电极间距离， σ 是晶体的电导率， μ 是载流子的迁移率， I_e 是发射极电流。因此，缩短电极间距离 S ，就会使 τ 减小，频率极限提高。另一方面，如图 4.5 所示，基极电阻会增大^[3]，由于反馈效应的作用，电路往往容易变得不稳定。所以晶体的电阻率也应适当地减低。

电极间距离通常设计为 0.05 毫米左右，高频晶体管则设计为 0.01 毫米以下。

点接触型晶体管，除了 A 型以外，还设计了在锗片两边装上发射极触针和集电极触针的双重表面型晶体管和有俩根发射极触针的四极型晶体管等等。

但是，点接触型晶体三极管只是在发明晶体三极管初期，在利用 α 大于 1 的开关上使用，现在已改用面结合型晶体三极管。

1.2 面結型晶体三极管

1.2.1 生长结系列

[1] 生长结三极管 这段概略地介绍一下各种生长结三极管晶体的制造方法,至于装配方法则将在第[3]段中加以说明。

(a) 两次掺杂法^[4] 使用图 4.6 的单晶拉制装置,首先

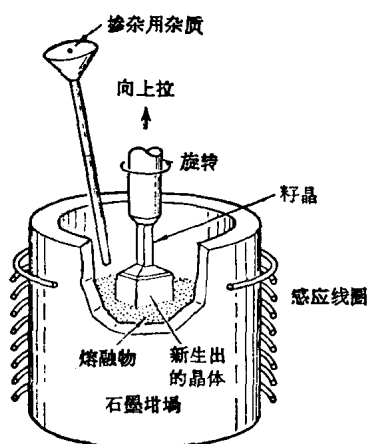


图 4.6 单晶拉制装置

熔化掺有锑、砷等施主型杂质的锗,由籽晶培育出构成集电极区域的 n 型单晶体。其次添加镓等受主型杂质,将基区的 p 型单晶体拉出 10—30 微米,最后大量添加锑、砷、磷等杂质,再一次培育 n 型单晶体的发射极区域。这种方法可以任意选择各区的电导类型和电阻率,缺点是发射极区域的施主型杂质扩散速度大,往往会在

控制发射极区域的过程中扩散到基极区域,以致消灭基区。因此,要制成获得良好频率特性所必需的均匀的薄基区层是相当困难的,即使把单晶拉制装置的温度控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的范围内,基区宽度也不会低于 20 微米左右。

(b) 生长速率法^[5] 如图 4.7 所示,当培育锗单晶体时,如改变其生长速率,则施主型杂质锑的分凝系数 k 会发生很大变化,但受主型杂质镓的分凝系数 k 基本上不发生变化。生长速率法就是利用这种性质的方法。

在熔融锗中添加适量的铟和镓,使单晶体缓慢地生长然后加以拉制时,由于铟的 k 值小,晶体便成为P型;加快生长速率时,由于铟的 k 值大,晶体便成为n型。因此,适当选择单位时间内晶体的

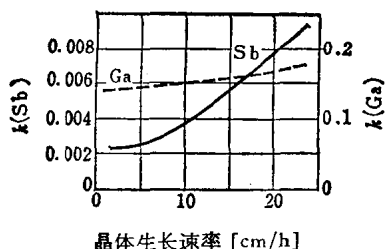


图 4.7 生长速率引起的 k 变化

拉制速度,并作周期性的改变,就能够形成几层特性不同的 npn 结,这样可以节约原材料,这是有利的方面,但是,这个优点也有其不利的一面,即限制各区电阻率的选择范围,特别是不能加强对基区的掺杂,难以使基区电阻减低。此外,这种方法跟两次掺杂法一样,由于受到铟扩散的影响,不能形成薄的基区,因而不大可能获得高频特性。

(c) 回熔法^[6](熔化淬火法) 回熔法是利用施主型杂质和受主型杂质的分凝系数 k 相差一个数量级这一性质的一种方法。把含有适当比例的铟和镓的 n 型锗单晶体切成窄条,取其一半急速加热熔化,使之再结晶,由于两种杂质分凝量不同,所以在凝固时,会在熔化的交界区域形成 P 型基区。这时,如减小窄条的热容量或缩短凝固时间,就可以减小杂质扩散的影响,形成薄基区。

(d) 回熔扩散法^[7] 这是一种把杂质的扩散效应和回熔法结合起来的方法:使经过回熔的窄条在一定时间内保持高温,则扩散系数大的杂质便在回熔区域(集电极区域)扩散而形成基区。

(e) 小晶体扩散法^[8] 先使极小的条状 P 型锗籽晶与含有 P 型、n 型两种杂质的半导体熔液接触,生长成晶体。这时, n 型和 P 型两种杂质都会分凝出来,但因 P 型的杂质多,

故成为 P 型晶体。然后使晶体保持高温，则长成的晶体中的 n 型杂质便在微晶中扩散形成基区。

(f) 生长扩散法^[9,10] 这种方法将在第(3)段叙述。

上述各种生长型三极管的晶体制造方法可归纳如表 4·1，各种产品如表 4·2 所示。

表 4·1 生长型晶体三极管一览表

	制造方法	截面略图	电阻变化图* ¹	基区 加速 电场	理论可能性* ²		形成结的 主要效应	窄条 的生 产率
					锗	硅		
a	两次掺杂法			无	nnp (pnp)	(nnp) (pnp)	分级掺杂	高
b	生长速率法			有	nnp		分凝系数之差	高
c	回熔法			有	nnp	(nnp) (pnp)	分凝系数之差	低
d	回熔扩散法			有	pnp	nnp	分凝系数和扩散系数之差	低
e	小晶体扩散法			有	(pnp)	(nnp)	扩散系数之差	低
f	生长扩散法			有	pnp	nnp	扩散系数之差	高

*¹ 水平虚线表示原来的电阻率，以区别各区域的变化。

*² 括弧内的型式尚未达到实用阶段。

[2] 晶体四极管^[11]

(a) 概述 这是为了提高使用频率极限，在普通生长型三极管基极对侧，另加第二基极 B_2 而制成的一种晶体管。如图 4·8 所示，适当选择 B_2 的偏置 I_{b2} 时，接近于 B_2 的部分发

表4.2 产 品 特 性 示 例

型 号	结 构	用 途	制造 方法	最大额定值 ($T_a = 25^{\circ}\text{C}$)						电学特性 (I_{cb} 以外是标准值)							工 作 例			
				V_{cb}	I_c	P_c	T_j	T_a	测量条件		h_{fe}	h_{ib}	f_{ab}	C_{ob}	I_{cbomax}	f	V_{cb}	I_c	PG	
				(伏)	(毫)(安)	(毫)(瓦)	($^{\circ}\text{C}$)		V_{cb}	I_b	(欧)	(兆)(赫)	(微)(微)(法)	(微安)	(兆)(赫)	(伏)	(毫)(安)	(分)(贝)		
2SC73	npn Ge	中频放大 器, 变频 器	a	15	5	30	75	85		-1	41	35	20	2	8($V_{cb} = -15\text{V}$)	2	8	1	27	
2N293	npn Ge	中频放大 器	b	15	20	65	85	85	5	-1			7	2.4	5($V_{cb} = 15\text{V}$)	0.455	5	1	39	
2N1289	npn Ge	开关	c	15	50	75	85		15	-10	50		40		5($V_{cb} = 1.5\text{V}$)					
2SA213	pnp Ge	高频放大 器	f	-15	-2	15	65	75	-6	1	20	50	130	0.7	-5($V_{cb} = -9\text{V}$)	100	-6	-1	11	
2SA124	pnp Ge	高频放大 器	f	-15	-2	15	65	85	-6	6	50	50	120	1.3	-8($V_{cb} = -15\text{V}$)	10	-6	-1	31	
2SC123	npn Si	高频放大 器	f	45	25	250	175	175	9	-1	140	39	35	3	2($V_{cb} = 30\text{V}$)					
2SC194	npn Si	高频放大 器	f	60	10	250	150	150	20	-1	21	60	50	3	0.1($V_{cb} = 60\text{V}$)					
2N336	npn Si	高频放大 器	f	45	25	150	175	200	5	-1	120	53	23	7	2($V_{cb} = 30\text{V}$)	5	20	-2	13	

射结,就处于反向偏压状态,这样,就只限于在第一基极 B_1 附

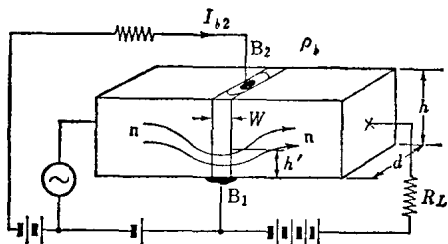


图 4·8 晶体四极管

(r_b' 将随着 I_{b2} 的增大而减少):

$$r_b' \propto \frac{\rho_b h'}{3Wd} \quad (4.3)$$

这时,集电极电容 C_{ob} 也会稍有减少,因此,增大 I_{b2} 时, $r_b' \times C_{ob}$ 的时间常数就减小,可以用来简单地改善高频特性。但是,这种晶体管需要两次接出基极引线,在操作上有困难;并且由于出现了高频特性优良的台面型三极管等等原因,目前基本上已不再生产。

图 4·9 是晶体四极管的 r_b' 和 NF 与 I_{b2} 的特性关系曲线。

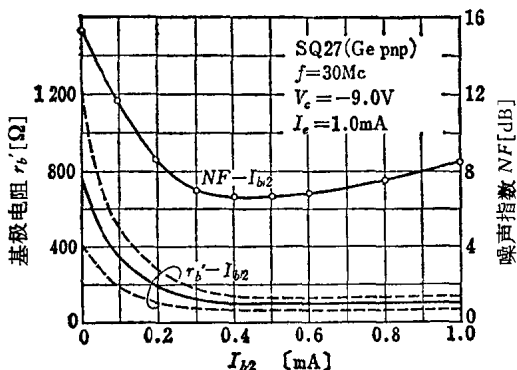


图 4·9 晶体四极管的 r_b' 和 NF 与 I_{b2} 的特性关系曲线

(b) 高频特性 由于 r_b' 随着 I_{b2} 的增大而减小, 所以如图 4·10 所示, 高频输入阻抗 h_{ie} 就急剧变小, 又由于 C_{oe} 减小, 输出导纳 Y_{oe} 也就变小. 此外, α 截止频率的变化将如图 4·11 所示, 所以把三极管当作四极型晶体管通过 I_{b2} , 就能增大高频输入输出阻抗比, 而且使 f_{ab} 增大, 从而可以改善高频增益. 同时由于 r_b' 的减小, 还可以改善噪声特性.

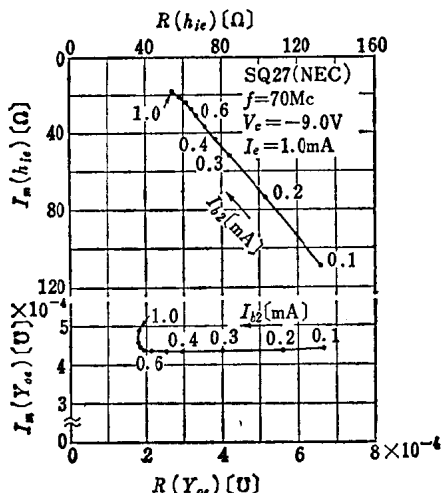


图 4·10 I_{b2} 引起的 h_{ie} 、 Y_{oe} 的变化

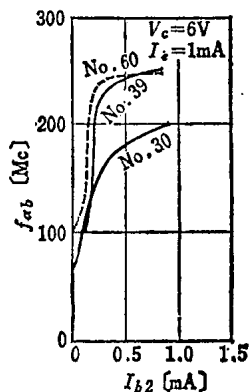


图 4·11 I_{b2} 引起的 f_{ab} 变化

[3] 生长扩散型晶体三极管^[9,10]

(a) 单晶体的制造 单晶体的制造方法与两次掺杂法相同: (1)先培育集电极区域, (2)再同时掺入形成基区和发射区的两种杂质, (3)继续进行控制. 在这种情况下, 在拉制发射区时, 基区杂质就向集电结区域扩散, 形成基区. 基区杂质必须选择扩散系数大的物质. 对于锗来说, n 型杂质的扩散系数大, 对于硅来说, p 型杂质的扩散系数大, 所以使