
半導体および半導体応用機器特集

低雑音高利得 MD 形トランジスタの製法と特性.....	101
拡散形メサトランジスタ.....	109
テレビ水平偏向用トランジスタ.....	116
シリコン制御整流素子とその応用.....	123
東北電力株式会社納高速切替形 12 Gc 多重電話送受信装置.....	133
高周波用トランジスタと高感度 FM/AM 受信機.....	140
半導体製品のディジタル計算機への応用.....	145
半導体製品の計測器への応用.....	154

低雑音高利得MD形トランジスタの製法と特性

Low Noise High Gain MD Type Transistors; Characteristics and Production Method

田内省二* 伴野正美** 高木武***
Shôji Tauchi Masami Tomono Takeshi Takagi

伊藤容吉*** 佐藤興吾****
Yôkichi Itô Kôgo Satô

内 容 梗 概

通信、工業計測などの広汎な用途を目的として、シリコンMDトランジスタTA-27(2SC166, 2SC167)を開発した。TA-27はさきに開発されたゲルマニウム低雑音トランジスタTA-37の姉妹品であり、逆耐電圧(BV_{CEO} , BV_{EBO})が高く、利得(h_{FE})が高い。さらに遮断周波数は標準30 Mc/sに達し、入力インピーダンスが低く雑音指数も低いという驚異的な性能を有する。

これらの特長を実現可能にしたMD単結晶引上法、画期的な素子の構造ならびに組立技術につき説明し、あわせてTA-27の電気的特性の詳細とその用途を紹介する。

1. 緒 言

成長接合法によると薄いベース層をもったnpnまたはpnp形単結晶が容易に得られる。この方法で高周波トランジスタを作ることがいろいろ試みられた。成長接合法には Multiple Doping 法⁽¹⁾, Rate-Grown 法⁽²⁾, 成長拡散法⁽³⁾, 浸漬成長拡散法⁽⁴⁾, Melt Quench 法⁽⁵⁾, Diffused Meltback 法⁽⁶⁾, Diffused Minicrystal 法⁽⁷⁾および Diffused Shot Melting 法⁽⁸⁾などがある。

しかし、これらの方法ではベース層の薄さと均一性に限界があり、再現性にも難しさがある。その上この種のトランジスタは構造上ベースリードの取付法に大きな問題点を残していたため、その種類、数量ともに減少している。

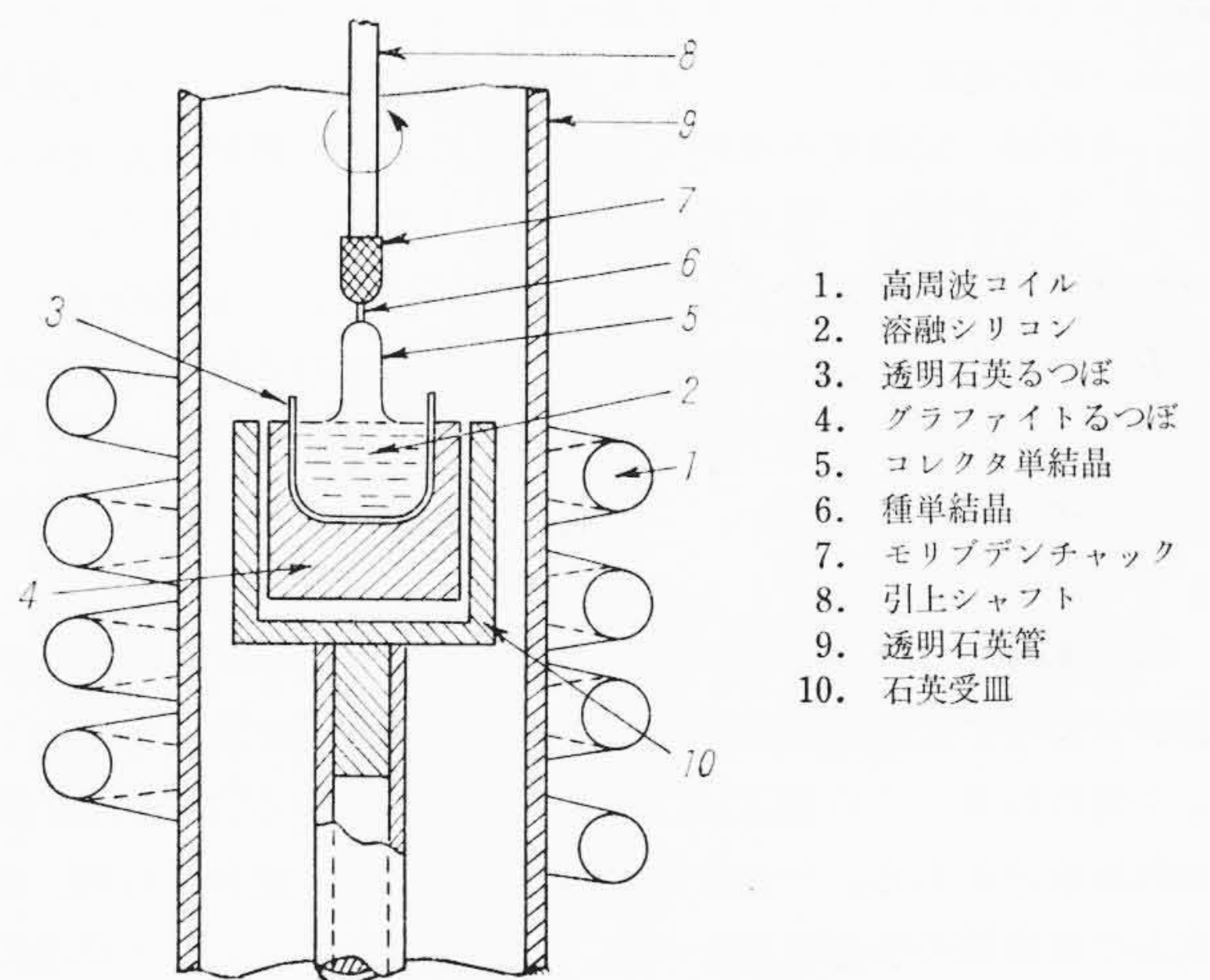
最近では拡散ベース形の Mesa 形あるいは Planer 形トランジスタが高周波トランジスタとして多く使われている。この場合においても遮断周波数および電流増幅率などの電気的特性の向上にはベース層の製造技術がキーポイントとなっている。製造技術的観点からベース層を均一にかつ再現性よく作ることが最も重要なことである。

われわれは成長接合形結晶の製法および拡散技術を組み合わせた新しい接合の形成方法を開発した。すなわち単結晶を成長させる過程において、融液中から固相中に不純物を直接拡散させる方法である。この方法によるときわめて薄くて、均一なベース層をもつpnpまたはnpn形の単結晶を容易に得られる。この方法を Molten Diffused 法(以下MD法と略す)と名づけた。MD法には上記の特長のほかに life time killer の少ない単結晶が得られる利点もある。

さらにわれわれはトランジスタバーの新構造を考案した。これに対しては拡散ベース形トランジスタの組立技術を適用できる。

上記のMD単結晶の製造技術および組立技術を確立することにより多くの特長をもつMD形トランジスタを開発した。MD形トランジスタの特長は、(1)従来の成長接合形トランジスタのもっていた組立上の欠点を取り除けた、(2)低雑音、(3)低電流領域において電流増幅率が大、(4)逆耐電圧が高い、などである。

本稿においてはMD単結晶の製法、接合部形成に際して融液内および固体内での不純物の挙動、単結晶内の不純物分布およびMD形トランジスタの構造について述べる。さらにMD形トランジスタの電気的特性についての検討結果を記す。



第1図 MD 単結晶引上装置

2. 単結晶の製法

MD法は融液からの単結晶の成長およびこの融液から単結晶中への不純物の拡散現象を利用したものである。

半導体単結晶中での不純物の拡散を考えるとシリコン中ではアクセプタが速く、ゲルマニウム中ではドナーの方が速い。このためMD法をシリコンに適用すると npn 形構造が、またゲルマニウムに対しては pnp 形構造が作りやすい。以下シリコンを用いる場合を例にして製法の説明をする。

単結晶引上炉の概要を第1図に示す。取り扱いの容易さおよびMD Processの直接観察の容易な点から高周波加熱炉を用いた。図はコレクタ結晶がシリコン融液に浸っている状態を示している。グラファイトルツボの内側に高純度の透明石英ルツボを置き、この中でシリコンを融解する。コレクタ結晶は種部分をモリブデンチャックでつかむことにより引き上げシャフトに固定されている。引き上げシャフトは任意の速度で上下動および回転ができるようになっている。これらはすべて透明石英管中に設置されている。結晶製造操作はアルゴンガス流中で行なわれる。

コレクタ単結晶はn形で比抵抗 $1\Omega\text{cm}$ である。溶融シリコン中にドナーおよびアクセプタ不純物を添加しておく。アクセプタはコレクタ結晶中に拡散してベース領域を形成し、ドナーはMD Process完了後に成長させた単結晶部分がエミッタとなるようにそれぞれの濃度を適量選ぶ。

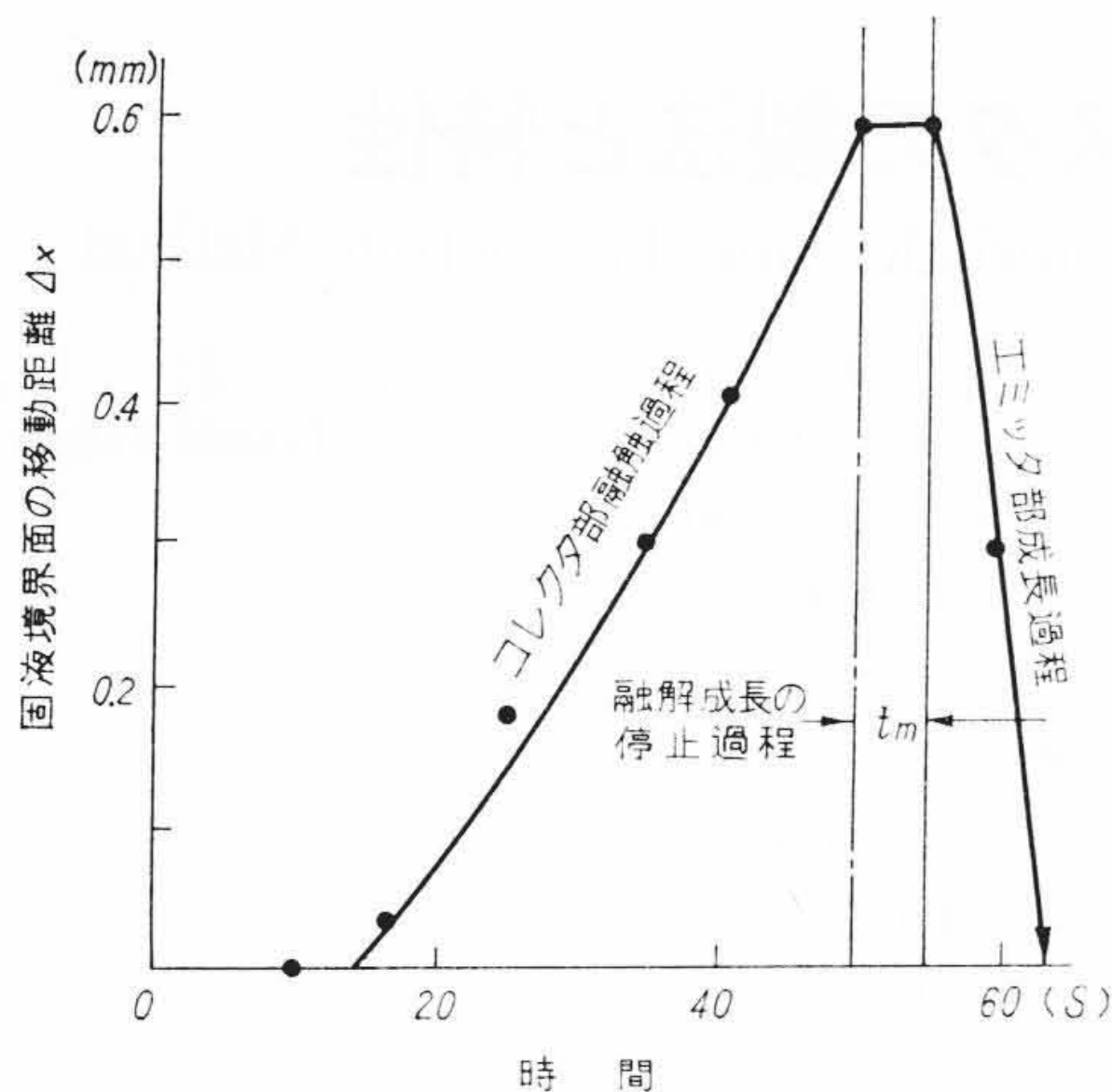
まずあらかじめ作っておいたコレクタ単結晶を上記シリコン融液

* 日立製作所中央研究所 理博

** 日立製作所武蔵工場 理博

*** 日立製作所中央研究所

**** 日立製作所武蔵工場



第 2 図 MD Process における単結晶成長面の移動

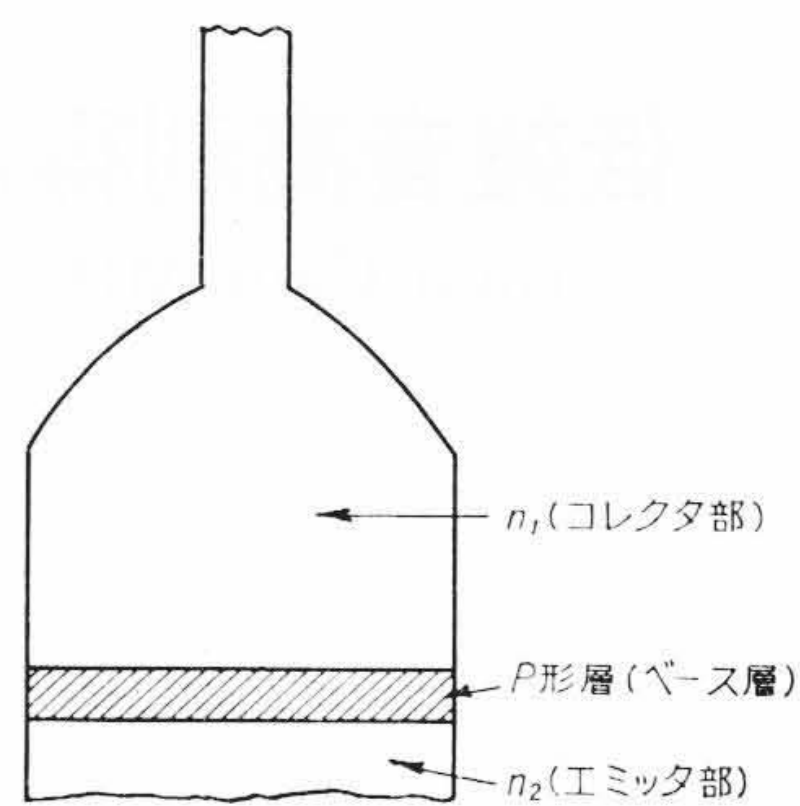
中に浸す。固体と融液との間ではほぼ熱的平衡状態が成立するまで両者をよくなじませる。平衡状態になってから溶融シリコンの温度をある一定の速度で上昇してコレクタ単結晶をゆっくりと融解させる。その後一定温度を保持して単結晶の成長も融解も完全に停止させる。この状態を一定時間保持する。この間に溶融シリコン中からコレクタ単結晶中にアクセプタ不純物が拡散して p 形のベース層を作る。コレクタ単結晶の融解速度は融液中での活性不純物の拡散速度より遅く、かつ固体中へのアクセプタの拡散速度より速くなるようにしなければならない。この過程が終わって後、急速に溶融シリコンの温度を下げてエミッタ部を成長させる (低抵抗の n 形)。

MD Process での結晶の融解速度、融解および成長の停止時間およびエミッタ成長速度は固液境界面の移動状態を測定することによって得られる。この測定にはカセットメータによる方法あるいは映画撮影法などがある。一測定例を第 2 図に示す。横軸は時間、縦軸は結晶の成長面の移動距離を示す。この図から、コレクタ結晶の融解量 Δx 、コレクタ結晶の融解速度 v_m 、融解停止時間 t_m 、エミッタ結晶の成長時間 t_b および成長速度など、MD 単結晶の特性を支配する重要な要素を知ることができる。

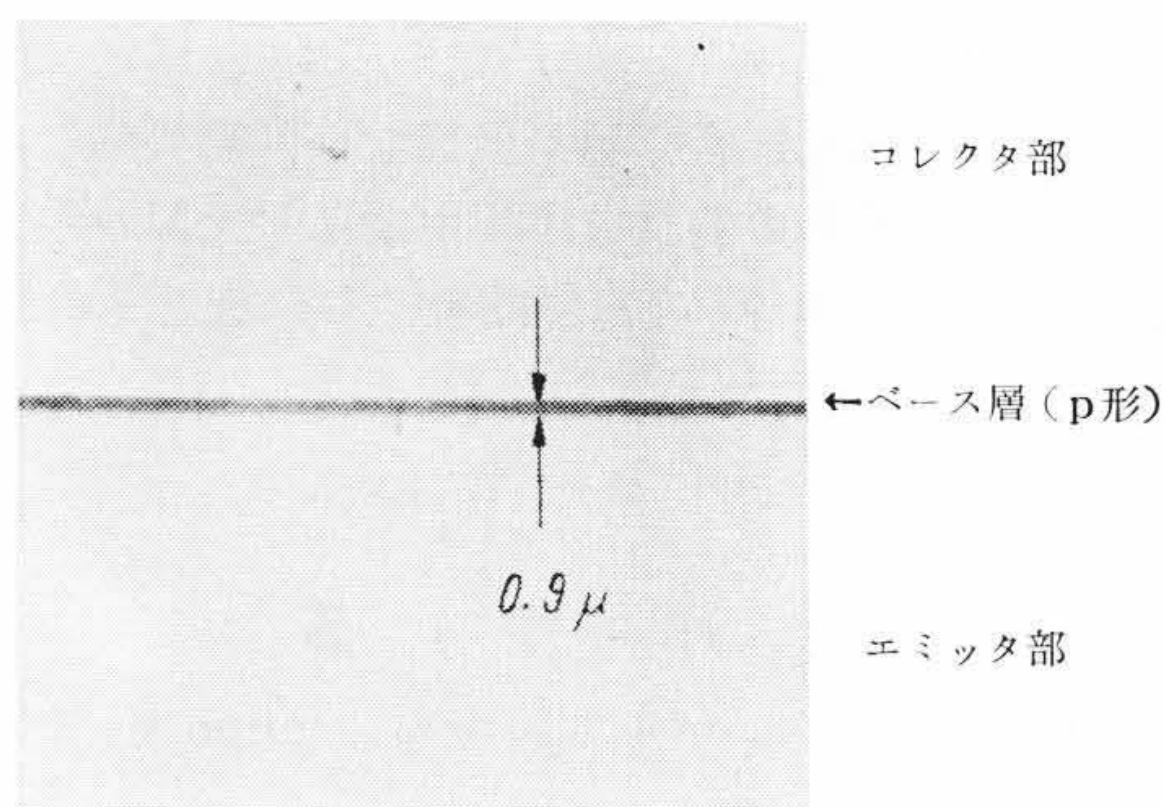
このような温度サイクルによって単結晶の融解と成長を実現するためには常に精密な温度制御が必要である。われわれはこの Process に精度が $\pm 0.01\%$ の自動温度制御装置⁽⁹⁾を用いた。さらに結晶成長面における著しい過冷却状態の存在することも考えられる。このことはシリコン MD 単結晶のエミッタ部を化学エッチした際みられるしま模様から推定される。MD Process においてコレクタ部の融解が停止し、成長もまた停止した状態から再び融液が急冷すると著しい過冷却が生ずる。したがってこのあとの単結晶の成長が間欠的に行なわれると考えられる。このような過冷却が存在するため結晶の成長以前に成長と融解を全く停止させた状態が実現しやすいものと考えられる。

第 3 図はシリコン npn 形単結晶の縦断面図を、第 4 図は実際の単結晶のベース部近傍の顕微鏡写真の一例を示す。図に明らかなようにきわめて薄く、均一なベース層ができる。

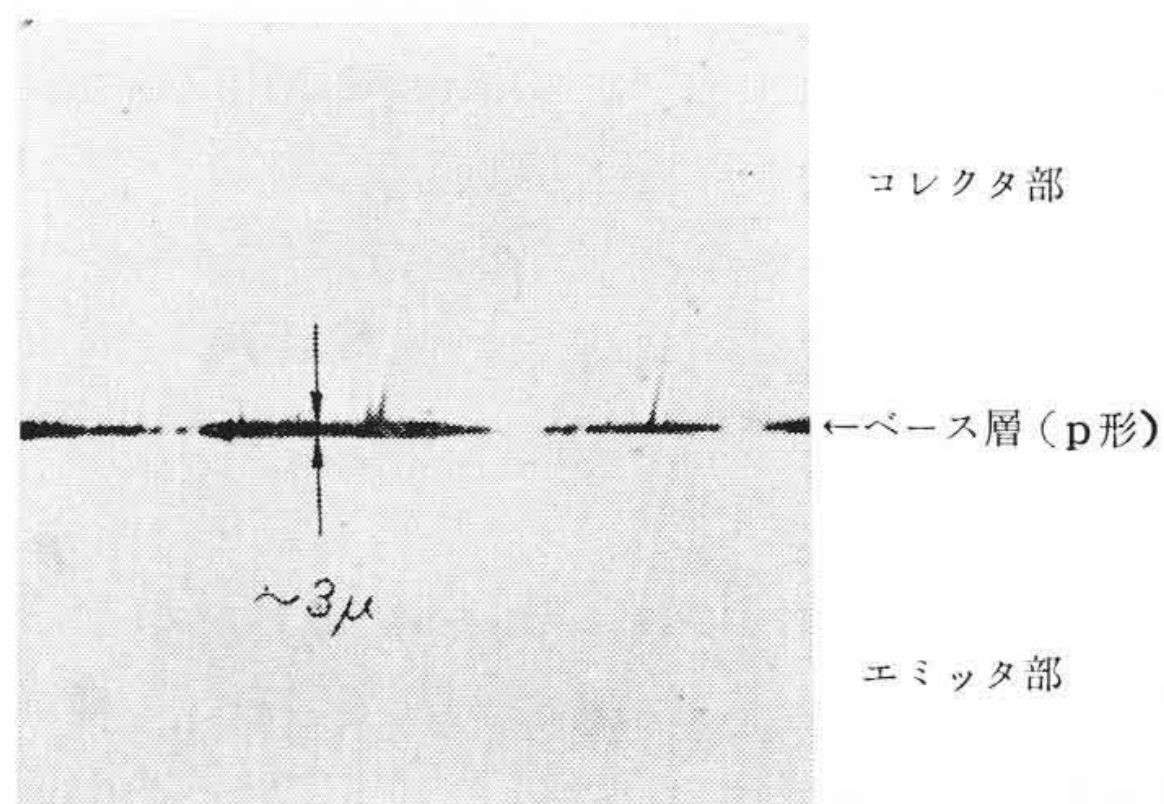
MD 法とよく似た接合形結晶の製造法に成長拡散法がある。この方法の概略を説明する。まずコレクタ結晶を下ナーおよびアクセプタを含むシリコン融液に浸す。固体と融液との間ではほぼ熱的平衡状態を成立させる。その後直ちにエミッタ部を引き上げこの過程で拡散の速い不純物をエミッタからコレクタ部に向かって固体間の拡散によって拡散させベース領域を作る。この場合不純物の拡散時間は炉の条件、結晶の形状、その他複雑な要素のため一定しない。したがって得られた単結晶中のベース層は $0 \sim 10 \mu$ 程度にばらつく。ときにはベース層の全くできないこともある。第 5 図は成長拡散法に



第 3 図 Si-MD 形単結晶の縦断面図



第 4 図 MD 形 Si 単結晶のベース部



第 5 図 成長拡散接合形 Si 単結晶のベース部

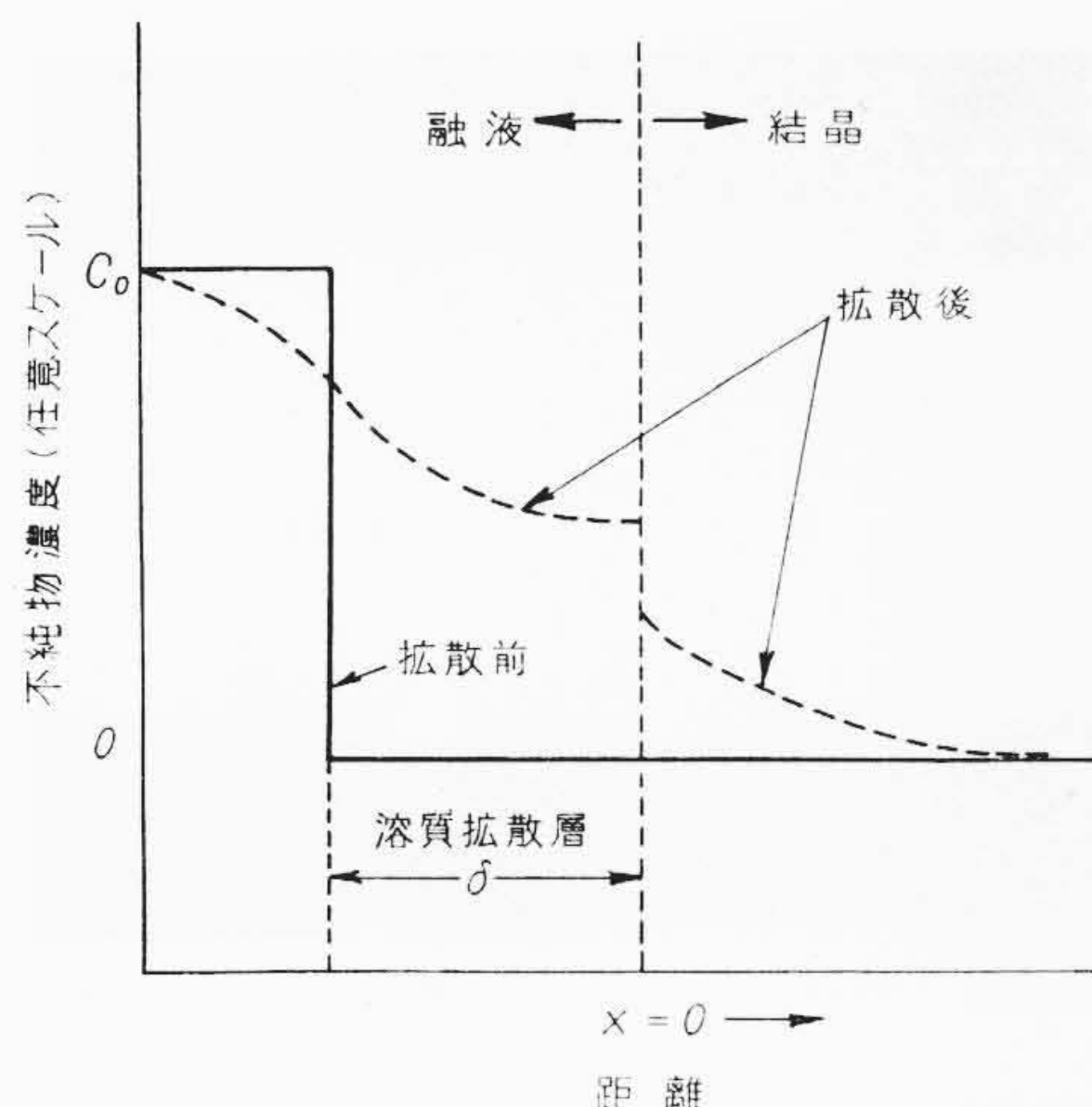
によるシリコン単結晶の断面写真を示す。

3. 結晶内不純物濃度分布

MD 法による単結晶製造条件の確立および単結晶の特性と、これを用いた MD トランジスタの電気的特性との関連を知ることが必要である。この章では MD 法でできた単結晶中の不純物濃度分布を、不純物添加量と結晶の引き上げ条件の関数として求める方法を述べる。

MD 法ではコレクタ単結晶の融解、成長ともに停止した状態で融液中から直接単結晶に向かって不純物が拡散する。拡散源不純物濃度は始めに用意した融液中の濃度に等しい。エミッタ部成長過程においては不純物の拡散は全く行なわれないことが望ましい。拡散時間は第 2 図の t_m (s) よりやや長くなり実際にはエミッタ部引き上げ中にもある程度不純物が拡散し、かつその場合結晶の引き上げにもなって接合部の温度も次第に下るため、この効果も考慮に入れる必要がある。

さらに重要なことは実際にはコレクタ結晶をごくわずかに融液中にとかし込むため融解停止直後の結晶の表面近傍の融液中のエミッタおよびベース不純物濃度は一たん零になる。単結晶の回転による攪拌(かくはん)効果などによって溶け出した融液の大部分はあらかじめあった融液とおきかわる。しかしながら結晶に接するわずかな融液層はそのまま残る。この層を不純物が拡散して結晶表面に到達、



第6図 MD Processにおける不純物の拡散状態

さらにこれがコレクタ単結晶中に拡散してベース層を形成する。このような結晶に接する融液中の薄い層は従来単結晶の成長の場合溶質拡散層 (Solute Diffusion Layer) と呼ばれている⁽¹⁰⁾。物質が決まれば回転引上法においてはこの層の厚さは結晶の成長速度と回転速度などによって決まる。

MD Processのように結晶が融解する場合にもこのような層があることが認められ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、その厚さはコレクタ結晶の融解速度と回転速度などによって変化すると考えられる⁽¹³⁾。結晶表面の不純物濃度の時間的変化はこの拡散層の厚さによって著しく変化するものと考えられる。この意味から前述のようにMD Processにおけるコレクタ部の融解速度(v_m)はベース層の厚さとこの部分の不純物濃度を定める重要な因子となることがわかる。実際の結晶内不純物濃度分布の解析にはこの場合の融液ならびに結晶内の不純物濃度分布を時間の関数として求め議論しなければならない⁽¹⁴⁾。

以上の考察からMD Processにおける不純物拡散の初期条件は模型的に描くと第6図の実線で示すようになる。点線は拡散後の不純物濃度分布を示す。結晶と融液との境界面を座標の原点にとり、かつ結晶側を正の方向にとってある。

固体内および融液内の不純物の濃度および拡散係数をそれぞれ C_s , D_s および C_m , D_m としてあらかじめ添加した融液内の不純物濃度を C_0 、添加不純物の平衡偏析係数を k 、溶質拡散層の厚さを δ とすると初期条件および境界条件は次式で示される。

$$t=0: C_m(x, 0) = \begin{cases} C_0 & (x < -\delta) \\ 0 & (-\delta < x < 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$C_s(x, 0) = 0 \quad (x > 0) \quad (2)$$

$$x=0 \begin{cases} D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} = D_s \frac{\partial C_s}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} k C_m = C_s \end{cases} \quad (4)$$

上記の条件をみたす拡散方程式の解は簡単に求まる。

$$C_m(x, t_m) = C_0 + \frac{C_0}{2} \left[\frac{-2\mu k}{1+\mu k} - \frac{1-\mu k}{1+\mu k} \operatorname{erf} \left(\frac{\delta-x}{2\sqrt{D_m t_m}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\delta+x}{2\sqrt{D_m t_m}} \right) \right] \quad (x < -\delta) \quad (5)$$

$$= \frac{C_0}{2} \frac{1-\mu k}{1+\mu k} \operatorname{erfc} \left(\frac{\delta-x}{2\sqrt{D_m t_m}} \right) + \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\delta+x}{2\sqrt{D_m t_m}} \right) \quad (-\delta < x < 0) \quad (6)$$

$$C_s(x, t_m) = \frac{k C_0}{1+\mu k} \operatorname{erfc} \left(\frac{\delta}{2\sqrt{D_m t_m}} + \frac{x}{2\sqrt{D_s t_m}} \right) \quad (x > 0) \quad (7)$$

ここで $\mu = \sqrt{D_s/D_m}$ においてある。大ていの場合 $D_s \lesssim 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$, $D_m \sim 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ で、かつ $k < 1$ だから

$$\mu k \ll 1 \quad (8)$$

したがって結晶内不純物濃度は次式のように簡単な式で表わされる。

$$C_s(x, t_m) = k C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x+\mu\delta}{2\sqrt{D_s t_m}} \right) \quad (x > 0) \quad (9)$$

(9)式の物理的意味は溶質拡散層があるため、見かけ上拡散源が $\mu\delta$ だけ遠ざかったことに対応している。

不純物は主として融液中から拡散するが、エミッタ部引上中にも固体間で多少拡散する。この場合の拡散の初期条件は(6), (8)および(9)式となる。簡単化のためこれらの式の誤差関数で近似する。これによる誤差は数パーセント以内である。エミッタ引上時間を t_p (s) とすると全体の不純物拡散時間 t_d (s) は

$$t_d = t_m + t_p \quad (10)$$

するとエミッタ引上完了後の結晶内の不純物濃度は

$$C(x, t) = \frac{k C_0}{2} \cdot \operatorname{erfc} \xi_0 \cdot \operatorname{erfc} \xi + \frac{k C_0}{2} \frac{1}{\sqrt{1+\alpha\eta}} \cdot \exp \left\{ -(\xi^2 + \alpha\xi_0^2 + \beta\xi_0) + \left(\frac{\xi - \frac{\beta}{2}\sqrt{\eta} - \alpha_0\sqrt{\eta}}{\sqrt{1+\alpha\eta}} \right)^2 \right\} \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\xi - \frac{\beta}{2}\sqrt{\eta} - \alpha\xi_0\sqrt{\eta}}{\sqrt{1+\alpha\eta}} \right) \right] \quad (11)$$

ただし $\xi_0 = \delta/2\sqrt{D_m t_m}$, $\xi = x/2\sqrt{D_s t_p}$, $\eta = t_p/t_m$

上記の考察にさらにエミッタ部引き上げに伴う接合部の温度降下を取り入れるため t_p の代わりに実効的な拡散時間として次式のような t_{eff} を用いる。

$$t_{\text{eff}} = \frac{1}{D(T_m)} \int_0^{t_p} D(T) dt \simeq T_p \left[1 - \exp \left(-\frac{t_p}{T_p} \right) \right] \quad (12)$$

$$T_p = \frac{R T_m^2}{\Delta H \cdot f \cdot \frac{dT}{dZ}} \quad (13)$$

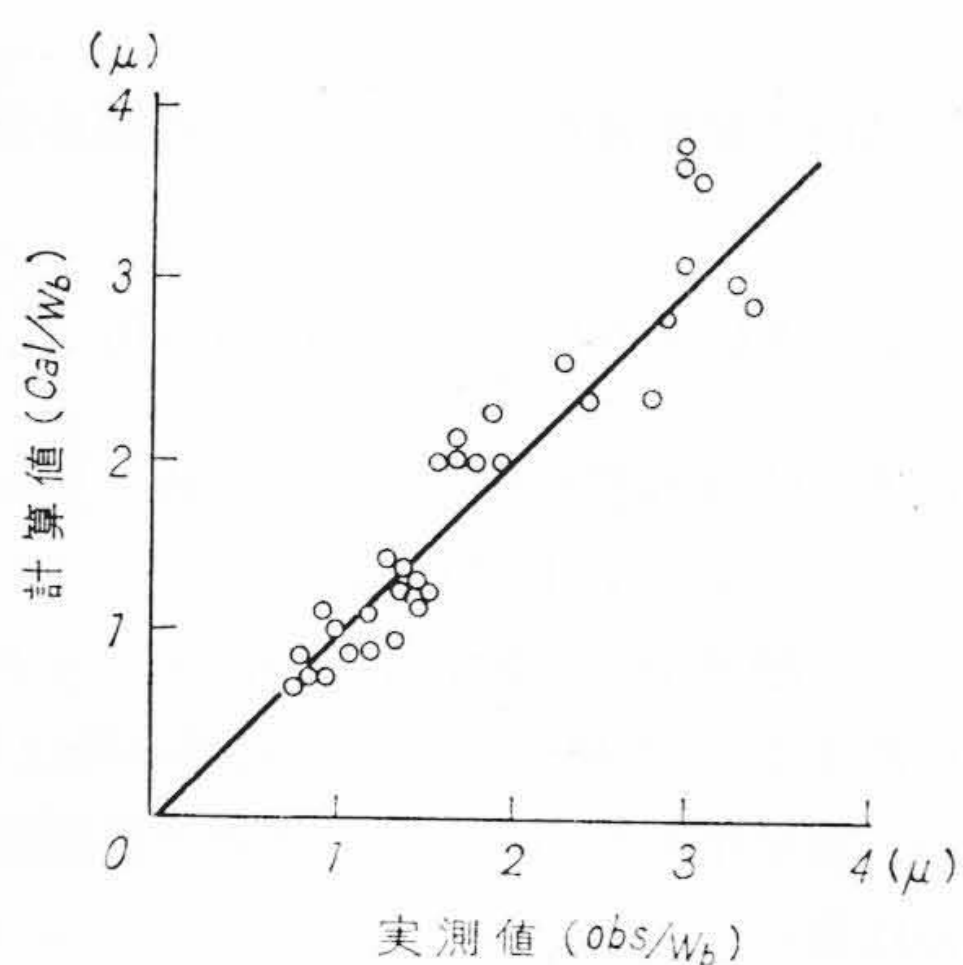
ここで T_m および T はそれぞれ融点およびエミッタ部引上中の接合部温度、 ΔH は固体中での不純物拡散の活性化エネルギー、 R は気体定数、 f はエミッタ引上速度、 dT/dZ は結晶内における引上方向の温度こう配で一応直線的に変化していると仮定した。(11)式の t_p の代わりに(12)式で求まる t_{eff} を用いれば実際の固体内不純物濃度が求まる。なおここで注意すべきことは(13)式で示される T_p は時間の時限をもった量でエミッタ部引上時間 t_p が大きくなった場合 t_{eff} は一定値 T_p に収れんすることが(12)式からわかる。このためエミッタ部引上速度 f を決めれば一定の不純物添加量に対し所望の厚さのベース幅をもったMD単結晶が再現性よくできる。すなわちMD法では t_p の大小によって f を加減し、不純物添加量を加減することにより均一なベース層をもつ結晶を確実に作ることができる。

上記のように(11)式および(12)式からMD結晶内の不純物濃度分布がわかる。特にトランジスタの主要なパラメータであるベース幅、ベース不純物濃度および分布を計算することができる。

筆者らは上記の考え方の妥当性を検討するため、ベース幅および濃度について実測値との比較検討を行なった。

第7図は製造条件の異なるシリコンMD単結晶についてのベース幅と、計算値との比較を示す。ベース幅の測定は Staining 法によった。

図において $W_b \text{ cal} = W_b \text{ obs}$ の場合を実線で示す。ベース幅の測定に多少の不精確さ(Staining条件によりベース幅は若干ばらつく)によりデータは多少ばらつくがかなり良い一致を示している。またこの方法によりシリコンに対し(コレクタ結晶の融解速度 $V_m = 20 \mu/\text{s}$ 、結晶の回転数 120 rpm の場合)溶質拡散層の厚さ(δ)は



第 7 図 Si-MD 単結晶のベース幅の計算と実験値との比較

第 1 表 銅デコレーション法によるベース中の有効最大不純物濃度

添加されたベース不純物濃度 N_{60} (cm^{-3})	コレクタ不純物濃度 N_{60} (cm^{-3})	ベースの消失する熱処理温度 ($^{\circ}\text{C}$)	有効最大不純物濃度 (cm^{-3})	
			固溶度から	コレクタ比抵抗変化から
5.8×10^{16}	0.93×10^{16}	690	3.1×10^{15}	3.7×10^{15}
1.36×10^{17}	1.0×10^{16}	800	2.0×10^{16}	1.5×10^{16}
2.06×10^{17}	1.0×10^{16}	840	3.0×10^{16}	2.3×10^{16}

0.1 mm である。またベース中の最大不純物濃度はゲルマニウム MD 単結晶 (pnp 形) について筆者らは独自の銅デコレーション法によりきわめて精度良く実測することができた⁽¹⁵⁾。

固体ゲルマニウム中の銅の拡散係数はきわめて大きく、置換形格子位置に導入された銅原子はアクセプタとして作用する。そこでゲルマニウム MD 単結晶薄片に銅メッキし、種々の温度で熱処理し、その温度での固溶限度 (最高固溶限は 800°C で $3.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) まで銅を単結晶片全体に導入した後急冷する。この処理を受けた薄片の比抵抗分布からベースの有無を判定すればベース層中の n 形不純物が銅原子のアクセプタ作用により打ち消されてベースの n 形導電性が消滅する処理温度が求まり、この温度での固溶限度からベース中の有効最大不純物濃度が求まる。ただし、1 個の銅原子が 1 個のドナー不純物の作用を打ち消すと仮定した。導入されたアクセプタ数は、これが導入されたためにコレクタ部の比抵抗が変化することからも求めることができる。

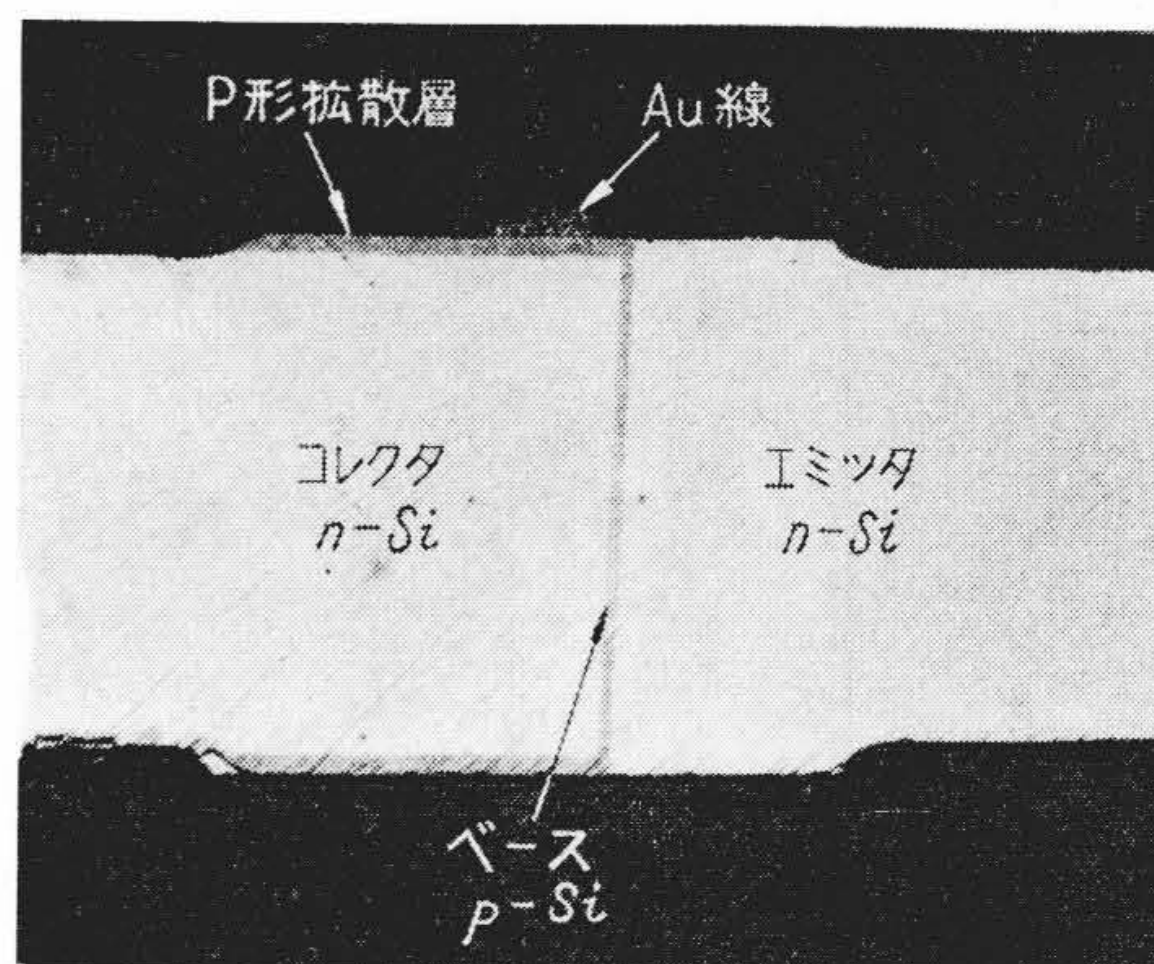
実験は添加されたベース不純物濃度がそれぞれ異なる三種類の結晶について行なった。これらについて固溶限度およびコレクタ部比抵抗変化から得られたベース有効最大不純物濃度の実測値を第 1 表に示す。シリコン中において拡散が速く、かつドナー不純物作用をもたらす物質を用いることによりこの方法はシリコン MD 単結晶にも応用できる。

4. MD 形トランジスタの構造

前記のように MD 法によればゲルマニウムに対しては pnp 形単結晶が、またシリコンに対しては npn 形単結晶が得やすい。この章ではシリコン npn 形単結晶を用いた場合を例に構造ならびに構成方法を説明する。

第 8 図はシリコン MD トランジスタ (TA-27: 工業計測用で高逆耐圧、高電流増幅率および低雑音を特長とする) のベース領域の近傍を拡大した顕微鏡写真を示す。ベースの構造が従来の成長接合形トランジスタと異なっている。すなわち、単結晶中にある本来の p 形中間ベースに連って、コレクタ半導体領域の表面に低抵抗拡散層を形成し、見かけ上ベース領域をコレクタ表面に拡張したような構造になっている。

この p 形拡散層は気相拡散法によって形成する。実際にはガリウムの気相拡散による。拡散層は素子の製造上、また特性上からみてエミッタ領域の n 形導電性を打ち消さぬ程度に低抵抗にすること



第 8 図 MD トランジスタの断面 (ベース近傍)

が望ましい。MD 単結晶 (一般の成長接合形単結晶についても同様) においてはコレクタ領域の活性不純物濃度はエミッタ領域に比べてはるかに小さい。したがって拡散層形成時において拡散源不純物濃度を調節することによりエミッタ側の表面の導電形を変換することなく、コレクタ領域表面にのみ p 形層を形成することができる。

第 8 図のトランジスタでは表面拡散層は表面不純物濃度約 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、深さ約 10μ である。

この拡散処理により MD 単結晶中の活性不純物濃度分布は当然変わってくる。計算および実測効果よりベース幅の拡がりは拡散処理前の 2 倍、ベース中の最大不純物濃度は約 50% 低減する (この計算では単結晶製造時におけるエミッタ成長時間が拡散処理だけ実効的に長くなったと仮定して、ベース近傍の結晶内不純物濃度分布を近似的に求めた)。

コレクタ領域の全表面に形成された拡散層はベースリード線を溶着するのに必要最小限を残して、ほかは化学エッチにより取り除く。TA-27 ではベースリード抵抗の低減、雑音特性および高信頼度化を図るため、ベースの表面露出部分の全面を上記拡散層でおおった。

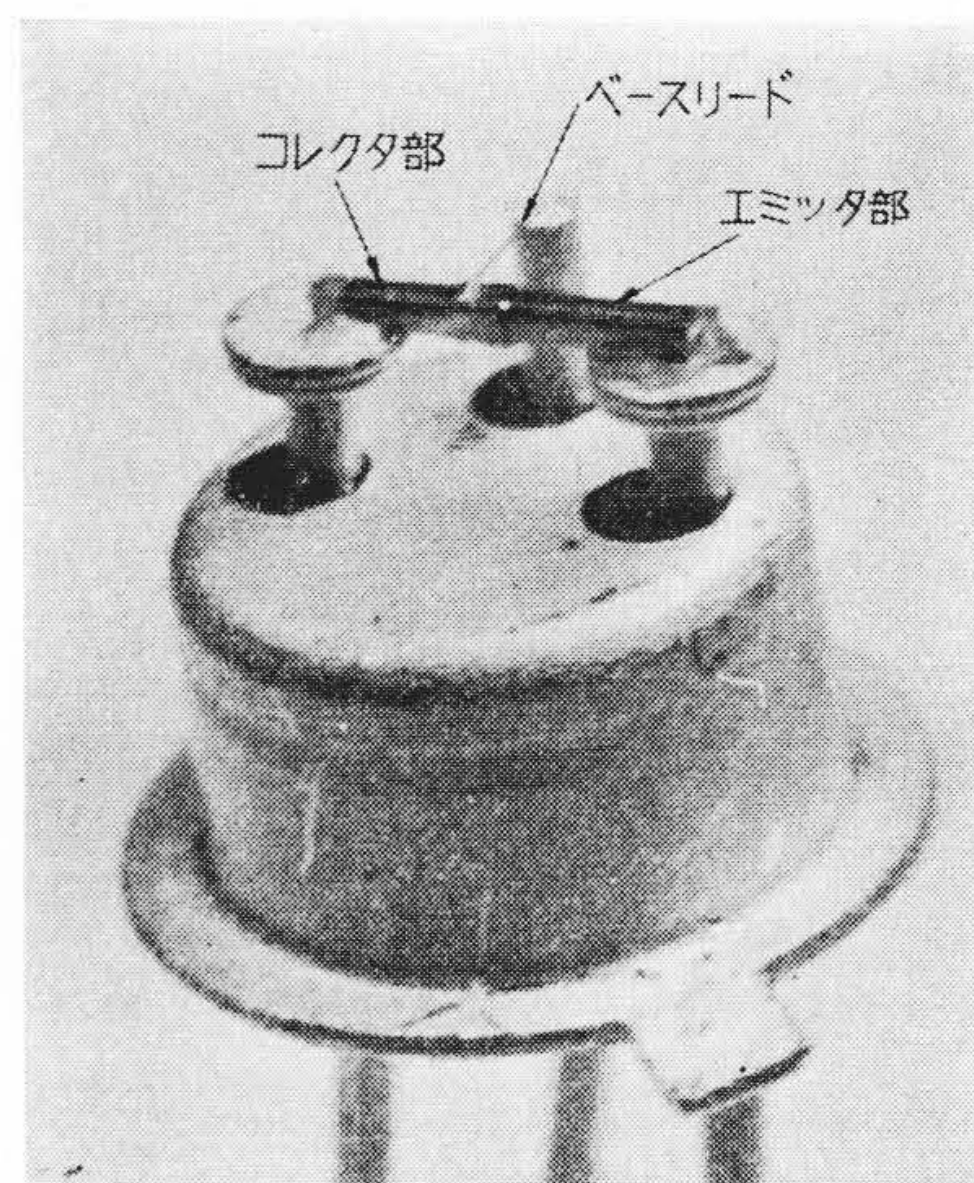
ベースリード線は一般のベース拡散形トランジスタのリード線取付法と全く同様な熱圧着法によった。この形のトランジスタ (成長接合形構造のトランジスタ) でこのようなベースリード取付法を適用した例はほかにない。

MD パーのコレクタおよびエミッタ領域はそれぞれステム電極の上部平坦部に金-シリコンの共晶合金を用いてろう付けした。

第 9 図は MD 形シリコントランジスタの構造全景を示す。外観は TO-18 形である。

上記のような構造をもつ MD 形トランジスタは以下に述べるような多くの画期的特長をもっている。

(1) 従来の成長接合形トランジスタにおけるようにベースリー



第 9 図 MD トランジスタの内部構造

第2表 TA-27 諸特性規格表

	項目	単位	試験条件	2SC167			2SC166A			2SC166B			2SC166C		
				下限	標準	上限	下限	標準	上限	下限	標準	上限	下限	標準	上限
コレクタベース間電圧	BV_{CBO}	V	$I_C=50\mu A$ $I_E=0$	55	115	—	30	110	—	30	100	—	30	85	—
コレクタエミッタ間電圧 ①	BV_{CEO}	V	$I_C=50\mu A$ $I_B=0$	55	—	—	30	—	—	30	—	—	30	—	—
コレクタエミッタ間電圧 ②	BV_{CEO}	V	$I_C=1mA$ $I_B=0$	45	—	—	30	—	—	30	—	—	30	—	—
エミッタベース間電圧	BV_{EBO}	V	$I_E=10\mu A$ $I_C=0$	5	10	—	5	—	—	5	—	—	5	—	—
コレクタ遮断電流	I_{CBO}	μA	$V_{CB}=12V$ $I_E=0$	—	—	10	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1
エミッタ遮断電流	I_{EBO}	μA	$V_{EB}=5V$ $I_C=0$	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—
コレクタエミッタ間飽和電圧	$V_{CE(SAT)}$	V	$I_C=6mA$ $I_B=0.2mA$	—	0.5	0.75	—	0.5	0.8	—	0.5	0.8	—	0.5	0.8
コレクタ容量	C_{ob}	pF	$V_{CB}=12V$	—	10	18	—	10	18	—	10	18	—	10	18
ベースエミッタ間電圧	V_{BE}	V	$V_{CB}=12V$ $I_C=3mA$	0.58	—	0.68	0.5	—	0.75	0.5	—	0.75	0.5	—	0.75
直流電流増幅率	h_{FE}	—	$V_{CE}=12V$ $I_C=3mA$	50	—	100	30	—	50	50	—	100	90	—	180
小信号電流増幅率	h_{fe}	—	$V_{CE}=6V$ $I_C=1mA$ $f=270c/s$	—	76	—	—	49	—	—	77	—	—	125	—
遮断周波数	f_{ab}	Mc/s	$V_{CB}=12V$ $I_C=3mA$	20	30	—	20	—	—	20	—	—	20	—	—
入力インピーダンス	$h_{ie(real)}$	Ω	$V_{CE}=12V$ $I_C=3mA$ $f=50Mc/s$	—	—	100	—	—	100	—	—	100	—	—	100

最大定格	BV_{CBO} (V)	BV_{CEO} (V)	BV_{CEO} (V)	BV_{EBO} (V)	I_C (mA)	P_C (mW)	T_f (°C)	T_{stg} (°C)
	55 (30)	55 (30)	45 (30)	5	30	200	150	-55~100
試験条件	$I_C \leq 50\mu A$	$I_C \leq 50\mu A$	$I_C \leq 1mA$	$I_E \leq 10\mu A$				

() 内は 2SC167 と 2SC166 A, B, C の最大定格の異なる場合の 2SC166 A, B, C の最大定格を示す。

ド取付法に Bonding 法 (通電溶着法) を用いないのでベースリード線とベース領域 (半導体単結晶) の接着部に欠陥構造が存在せず、各接合 (ベースコレクタおよびベースエミッタ接合) の完全性が維持されているから逆耐電圧は高い。

(2) 一種のリングベース形構造をもっているのでベース抵抗が低減される。

(3) 本来のベース領域の外表面が低抵抗拡散層で被覆されているためベース領域外表面にはエミッタより注入された少数キャリアの表面への流出を阻止するような電界がある。

この効果と (1) の理由からキャリアの表面再結合のゆらぎに起因する $1/f$ 雑音が少ない。

(4) エミッタベース間にいわゆる Over lapping 容量を生じない。

(5) ベース領域外表面にチャンネルを生ずることによるトランジスタの劣化の心配がない。

(6) 構造全体として機械的強度が高い。

(7) 量産向きである。

5. MD トランジスタの種類とその特徴

MD トランジスタは 1959 年以来、シリコン、ゲルマニウム、合わせて数種類のトランジスタが開発された。シリコン NPN 形では α 遮断周波数 f_{ab} 数 10 Mc/s の TA-17 (CES 登録名 2SC157) 系列 4 種、これより遮断周波数の高い TA-21 系列があり、さらに TA-27 (CES 登録名 2SC166, 2SC167) に発展した。ゲルマニウム pnp 形では電流増幅率 180, コレクタ容量 1.6 pF, f_{ab} = 約 200 Mc/s の TA-34, 1 kc/s 以下から 2 Mc/s 程度まで一定の低雑音水準を維持し電流増幅率、遮断周波数が高く入力インピーダンスが低い TA-37⁽¹⁶⁾ などが代表例である。

三年間にわたる開発の途上シリコン MD トランジスタは α 遮断周波数 600 Mc/s をマークし、ゲルマニウム MD トランジスタでは 800 Mc/s を越えるものも製作された。この成果は国産メサトランジスタの実用化以前の当時としては記録的なものである。

1960 年 12 月より成長形構造のトランジスタのベース引出線取付方に画期的な改良を加える試作品が作られはじめた。本改良は前記のとおりベース表面とコレクタ側に低抵抗の拡散層を設け、これよりベース引出線を取り出すものであり、まずゲルマニウム MD トランジスタに応用され前述の TA-37 が完成した。その後、同方法をシリコン MD トランジスタに用いた TA-27 が生産に移された。

これら各種の MD トランジスタの特性を全部紹介するのは繁雑になるため、今回は TA-27 の電気的特性について詳述する。

6. TA-27 の電気的特性の特徴

TA-27 は、通信用あるいは工業計測用の広い用途に向く低原価の汎用シリコントランジスタを目的として開発されたもので、おもな特長を列記すると次のようになる。

- (1) コレクタベース間およびエミッタベース間、逆耐電圧が高い。
- (2) コレクタベース、エミッタベース接合の逆方向電流が小さい。
- (3) 直流電流増幅率が高く、その分布の偏差が少ない。
- (4) 低雑音特性にすぐれている。

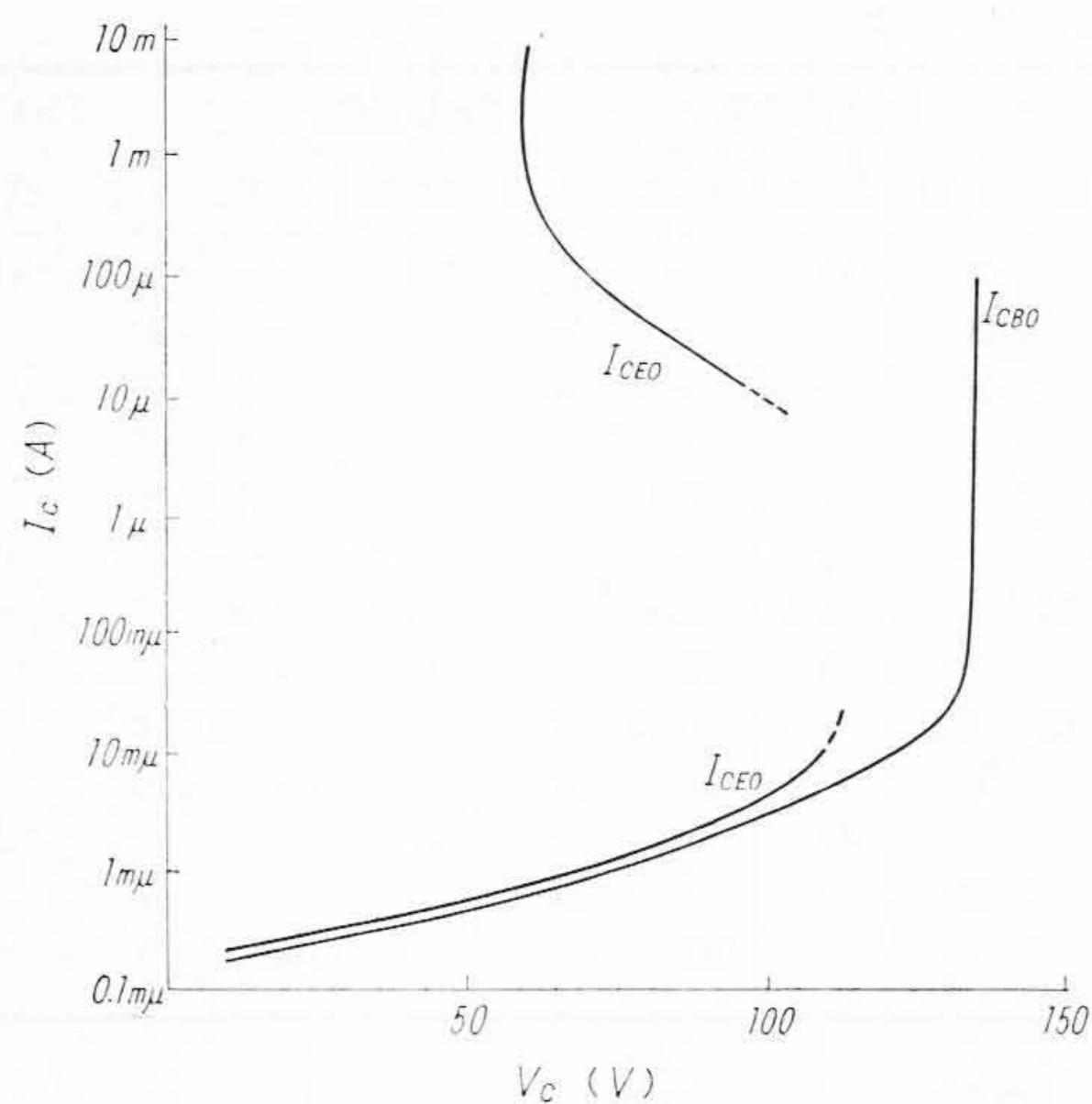
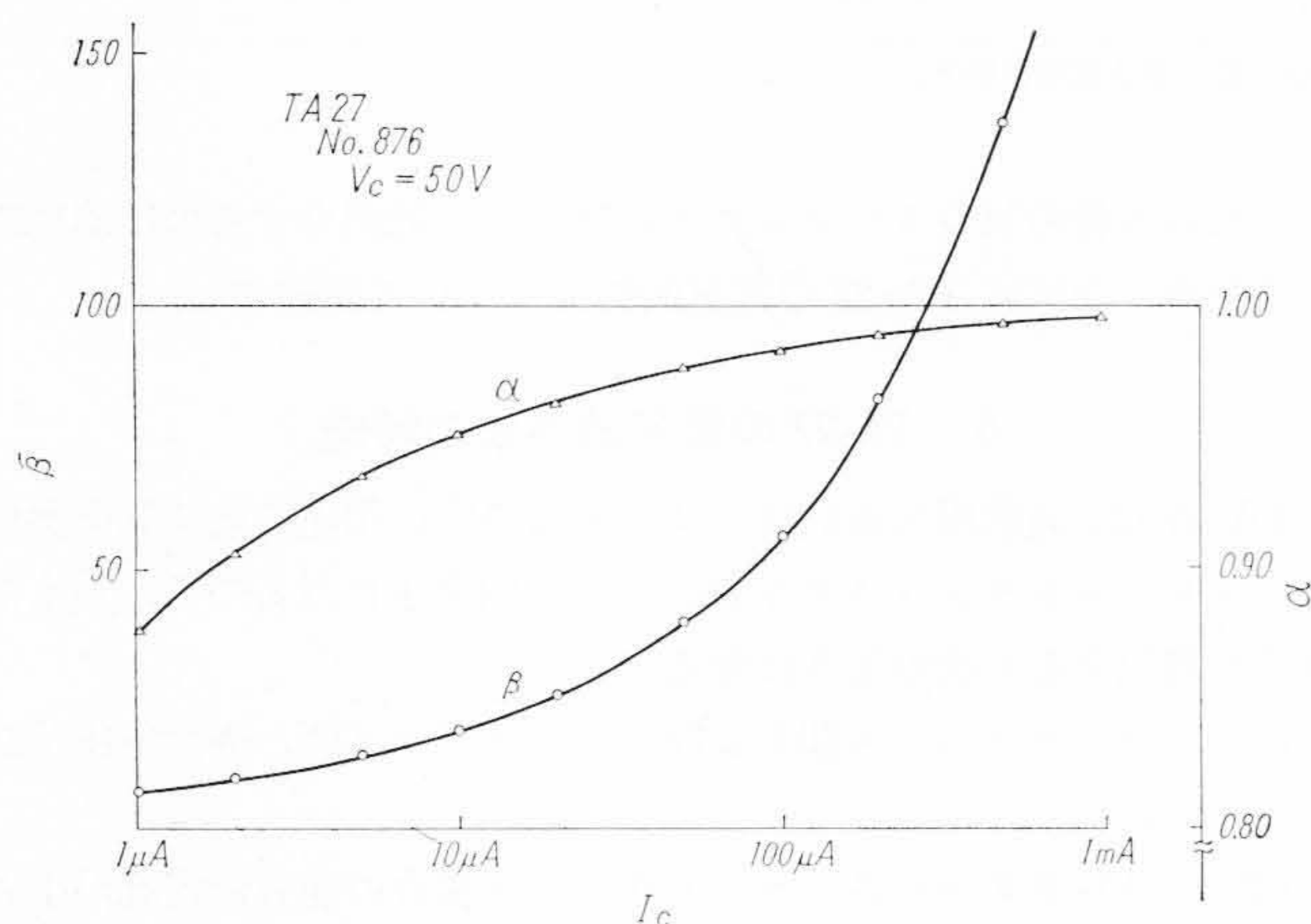
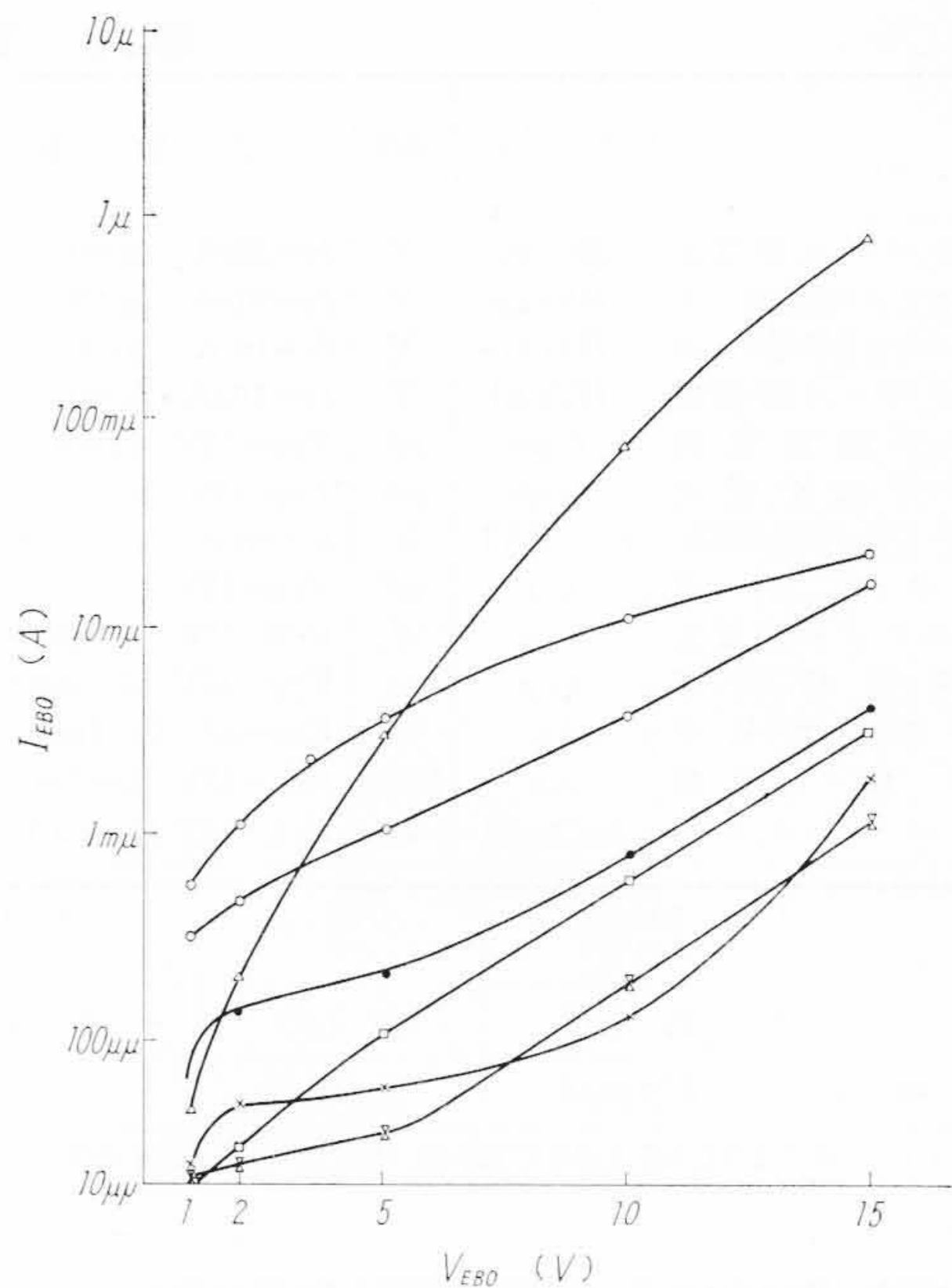
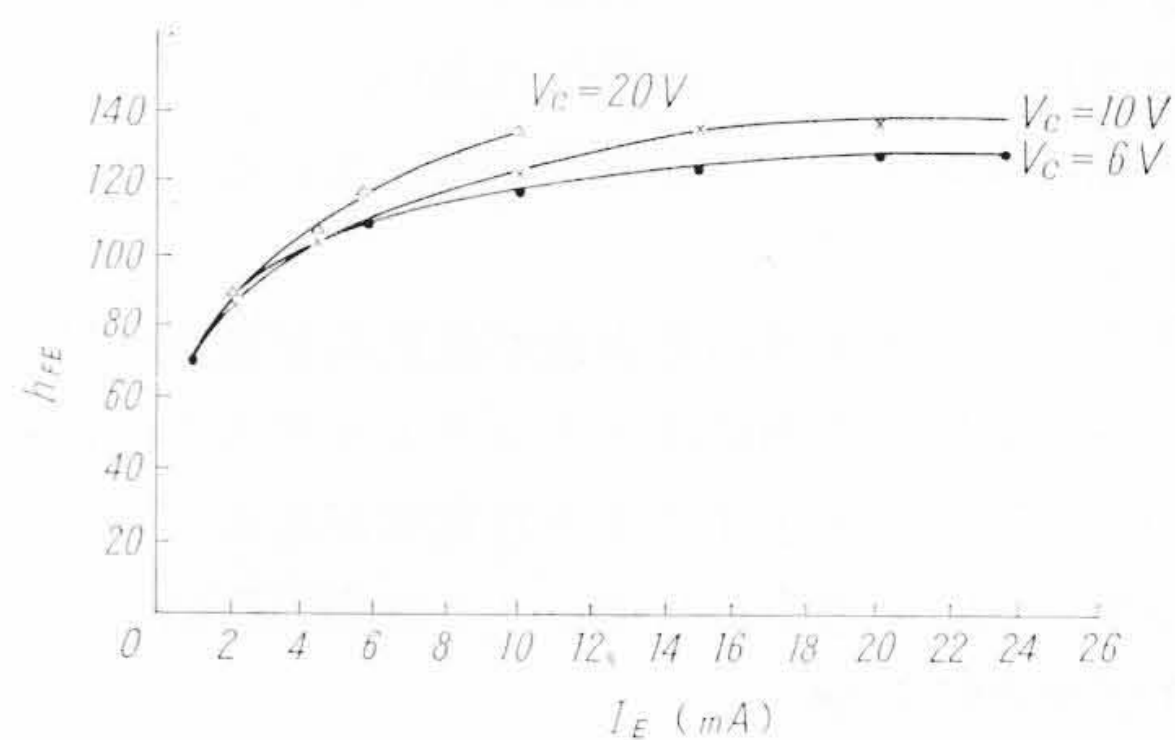
このほか、信頼性や機械的強度の点でもすぐれており、収率も高く原価的にも有利である。第 2 表に TA-27 の電気的特性を、CES 登録名称 4 区分に従って示した。

7. コレクタ接合の逆方向特性

特長の (1) に関連して、このトランジスタは高い電源電圧をコレクタエミッタ間に加えても、なお十分余裕があるよう第 2 表に示すように、 V_{CEO} に 30V と 50V の二規格を設けた。

コレクタベース間に注目すれば、コレクタ表面をおおったベースと同形の p 形拡散層は、本来のベース層やコレクタ部分の不純物濃度に比べ格段と高く、まずこの部分でなだれ降伏が起こると考えられるが、実際のコレクタベース間降伏電圧は 85~115V で、コレクタ比抵抗より推定される値としてはかなり高い。これは両接合部分が急激ではなく、 $10^{19} \sim 10^{20}/cm^4$ の不純物濃度こう配を有しているためと考えられる。

上記特長の (2) にも記したとおり、コレクタベース間、あるいはコレクタエミッタ間逆方向電流は、それぞれ降伏電圧 BV_{CEO} に比べ十分低い範囲では $10m\mu A$ 以下の低電流を維持していることが第 10 図からわかる。これは TA-27 がベース引出線取付に際し、従来の成長形構造のトランジスタのようにボンディングを用いて接合を破壊することなく、熱圧着法を採用しているためと考えられる。このことは、ベース周辺部が露出していない点と同様トランジスタの信頼度に良い影響を与えることは明らかである。第 10 図において I_{CEO} は $1\mu A$ から $1mA$ の領域で急峻な負性抵抗を示しているが、これは第 11 図に示す同じ電流領域の α および β の急激な増加と対応して

第 10 図 TA-27 I_{CEO} , I_{CBO} の電圧依存性第 11 図 高いコレクタ電圧における $I_c = 1 \mu A \sim 1 mA$ での α および β の増加第 12 図 TA-27 の V_{EBO} と I_{EBO} の関係第 13 図 h_{FE} の I_E 依存性

いる。

8. エミッタ接合の逆方向特性

第 2 表にも示すように BV_{EBO} にして平均 10 V 程度の値を示すが、第 12 図の測定結果に示すように大部分のものは $V_{EBO} = 10 V$ において $I_{EBO} = 10 m\mu A$ 以下で、コレクタベース間同様非常に良い逆方向特性である。これは前記したとおりベース引出線の取り付けに際し、エミッタベース接合に損傷を与えないことによるものである。また構造上からわかるように、エミッタ表面は p 形の反転層が存在しないためエミッタ側にはいわゆる over lapping 容量も全く存在しない。

9. 電 流 増 幅 率

TA-27 は直流電流増幅率で 3 区分されている。従来シリコントランジスタは life time の大きい結晶が得にくいというに、製造中の拡散工程で、life time killer の混入などが原因して h_{FE} を高くすることが困難であり、これを補う方法としてエミッタの不純物濃度をベースに比べてかなり高くすることにより、注入効率を上げ、あるいはベース幅を狭くして少数キャリアの到達率を高めるなどの方法がとられてきた。これらの手段は h_{FE} の増大には有効であるが、ベース抵抗が高くなることおよびエミッタコレクタ間の貫通電圧が低くなる欠点があった。しかし TA-27 においてはベース周辺部分の改良により、ベース抵抗の増大の恐れは少なく、またエミッタ側の比抵抗はベースのそれに比べ約 2 けた低く設計されている。

第 13 図に TA-27 の h_{FE} の I_E 依存性を示す。このトランジスタ

の特長として h_{FE} は $I_E = 25 mA$ 程度まで増加し続け、TA-27 の最大損失から考えて、実用上の電流範囲では h_{FE} は減少することはない。定性的な考察のために合金形トランジスタに対する Webster の式を用いると、電流増幅率、 α_{cb} は次式で示される。

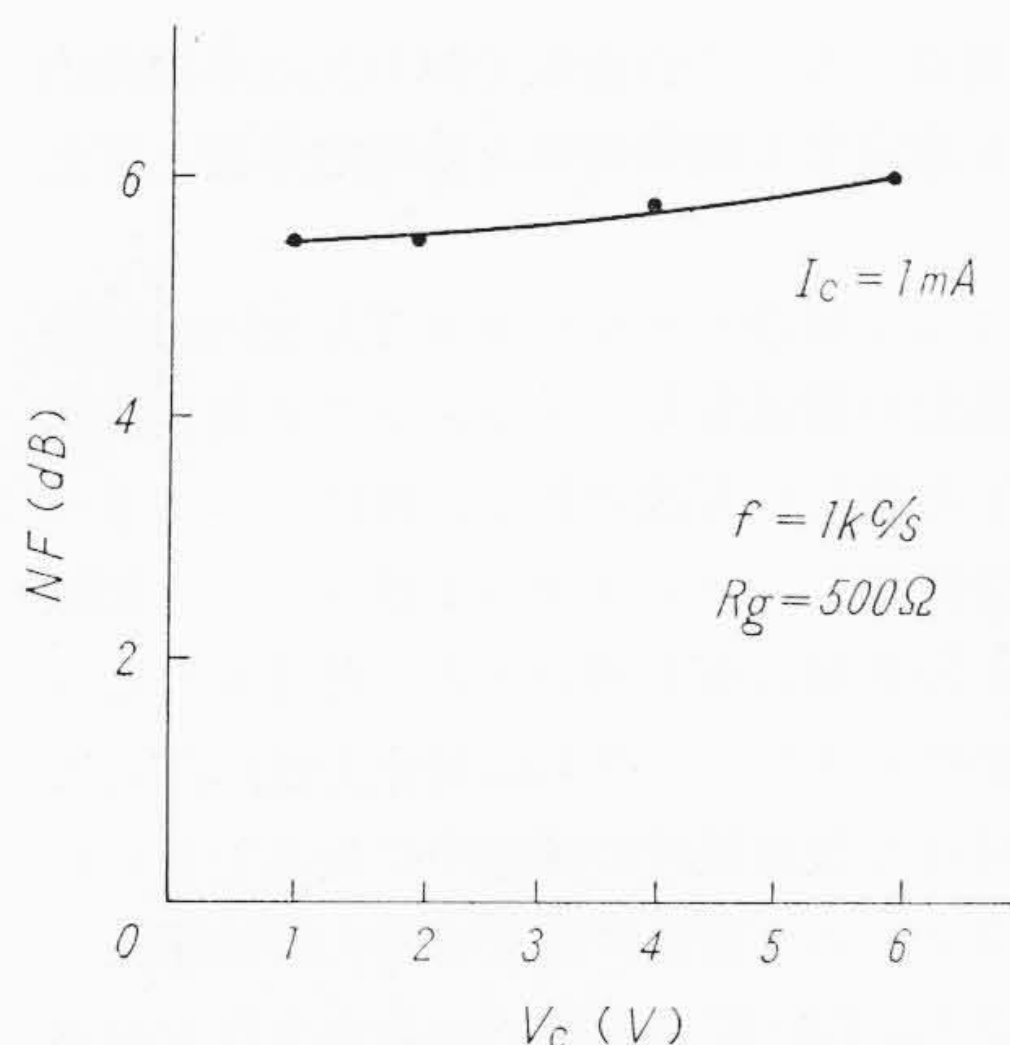
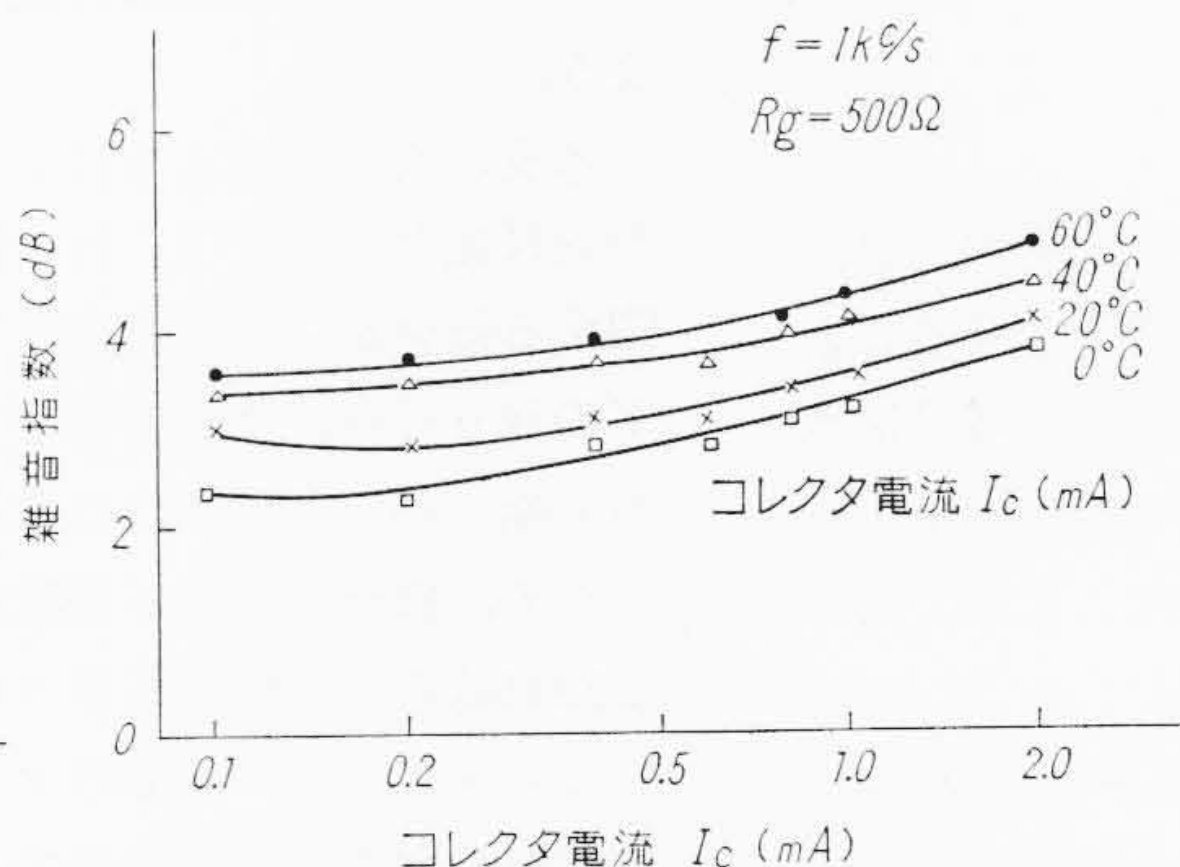
$$\frac{1}{\alpha_{cb}} \approx \frac{S W A_s}{D_e A} g(z) + \left[\frac{\sigma_b W}{\sigma_e L_e} + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_b} \right)^2 \right] (1+Z)$$

$$Z = W \mu_p I_E / D_e A \sigma_b$$

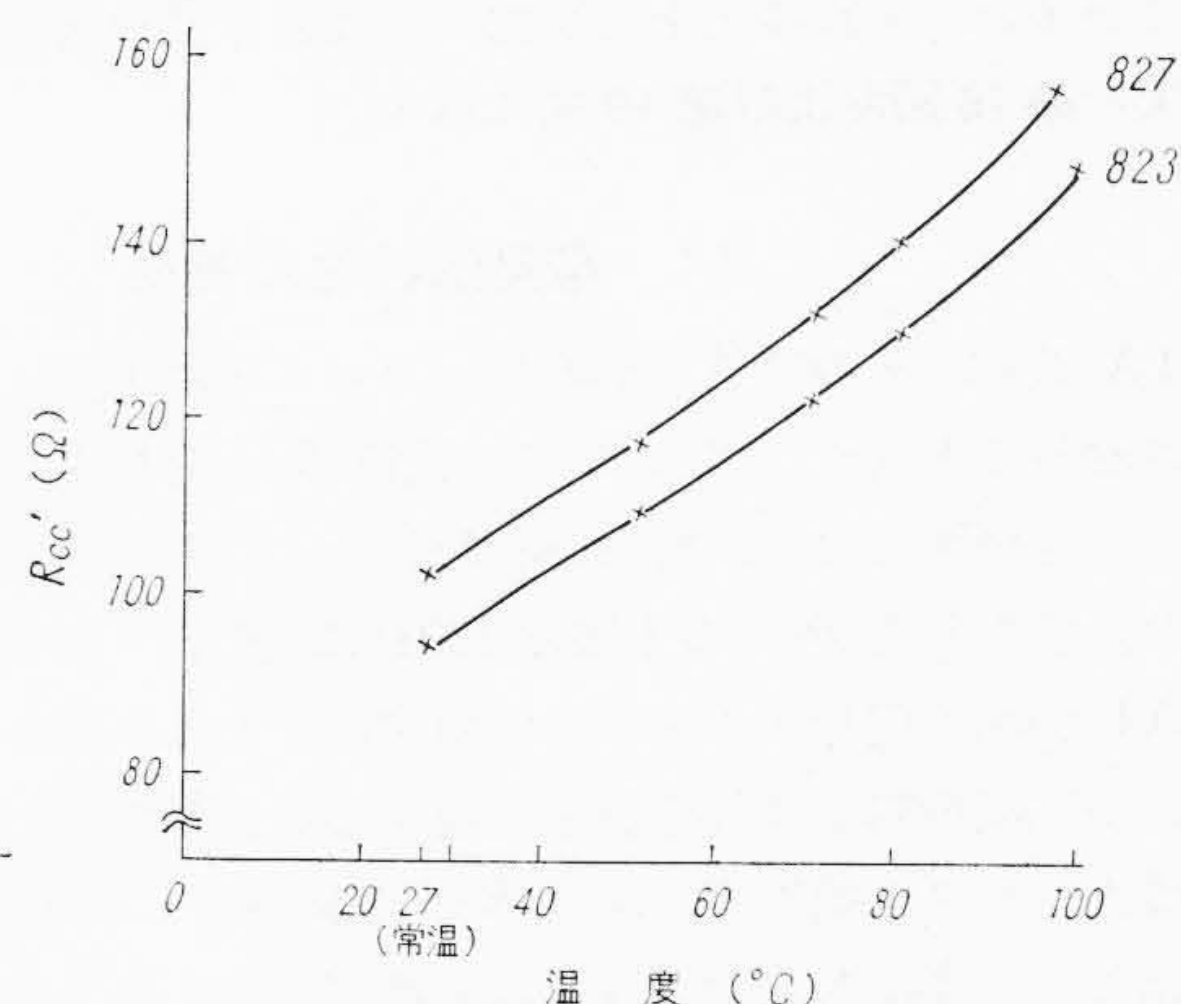
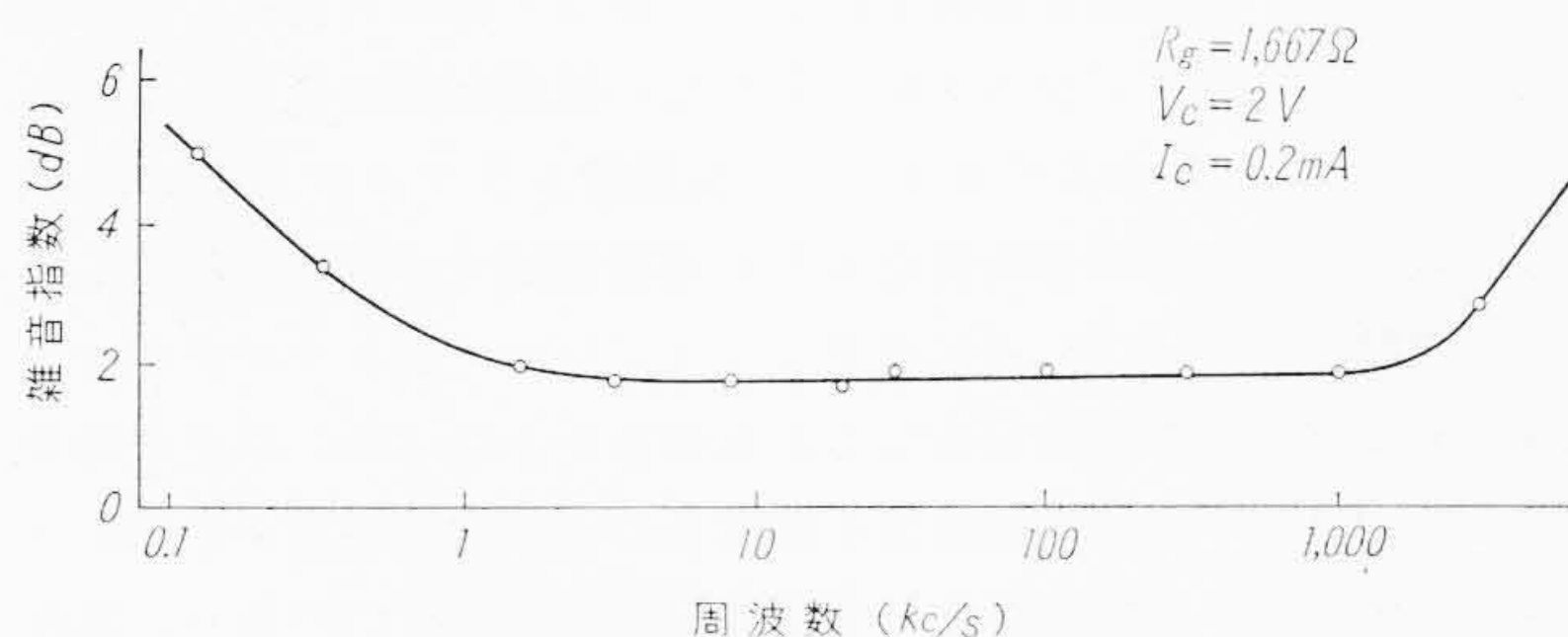
A はエミッタベース接合の断面積、 S は表面再結合速度、 A_s は表面再結合の起っている面積であり、 σ_b , σ_e と L_b , L_e はそれぞれベース領域、エミッタ領域の電気伝導度と電子および正孔の拡散距離、 W はベース幅、 μ_p は正孔の移動度、 D_e はベース内の電子の拡散係数である。また $g(z)$ は高電流密度における補正項である。上式のうち、表面再結合の効果を表わす第一項のみがエミッタ電流 I_E の増加とともに α_{cb} を増大させるように作用する。これは I_E の増加によってベース中に発生した電界がベースに注入された電子を加速することによって表面再結合により失われる電子を少なくするためであり、換言すれば拡散定数 D_e が実効的に大きくなることを意味する。 D_e を一定と考え、 $g(z)$ で表わせば $g(z)$ は I_E の増加につれて減少し 0.5 に収れんする。

第 2 項はベースへの電子の注入効率に関係し、また第 3 項はベース内部の再結合に関係した項であるが、いずれも I_E の増加とともにベースの電気伝導度が変化することにより減少する。

以上のことから TA-27 が高い電流密度まで電流増幅率が増加し続けることは、表面再結合の影響が大きなこと、およびさきに述べたようにエミッタ領域の不純物濃度がベース領域のそれに比べ 2 けた

第15図 TA-27 雑音指数
コレクタ電圧依存性

第16図 TA-27 NFの温度依存性

第17図 コレクタ抵抗 R_{cc}' の
温度変化

第14図 雑音指数の周波数変化

高く、大電流密度になっても注入効率の低下が顕著に現われないためと思われる。

10. コレクタベース間容量

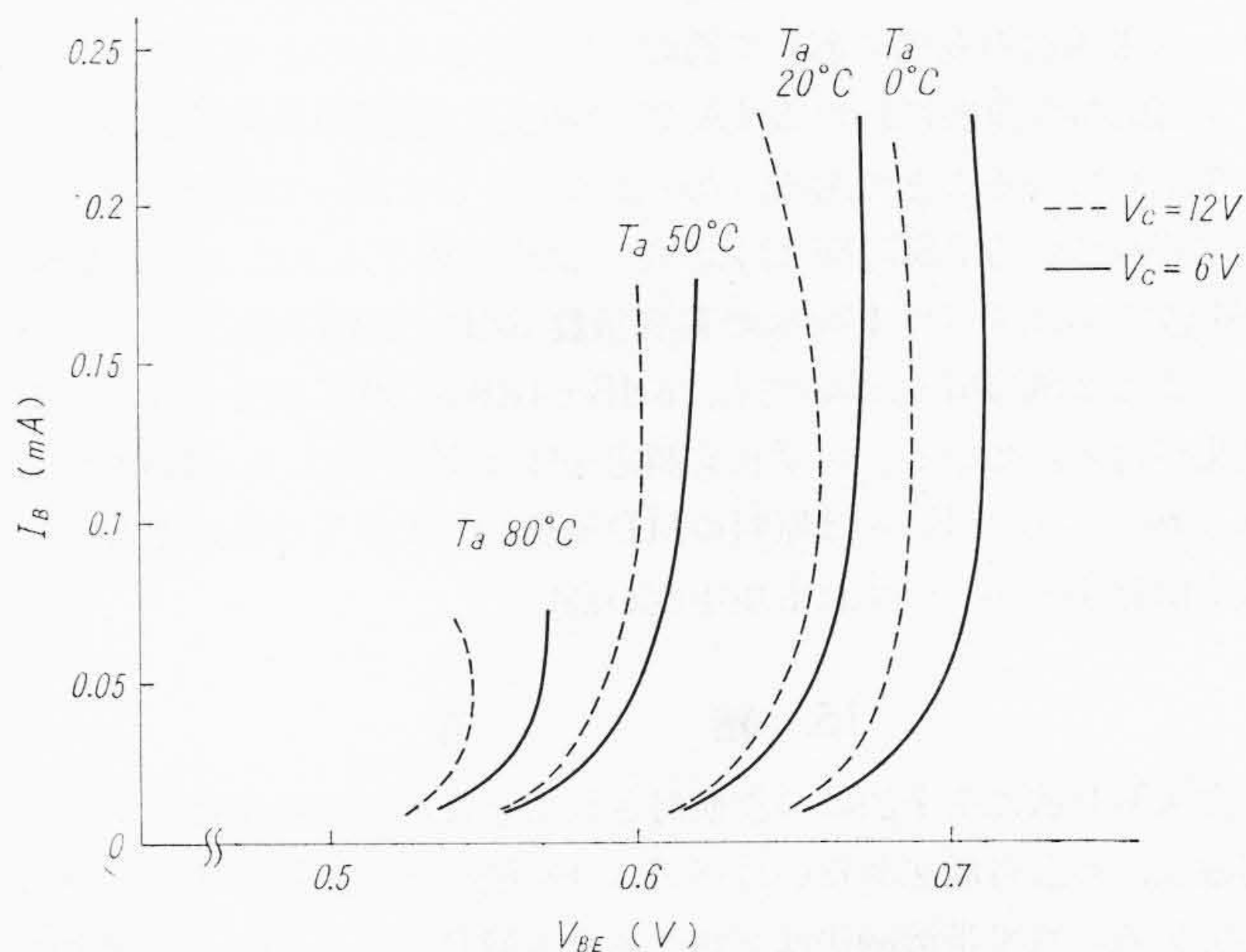
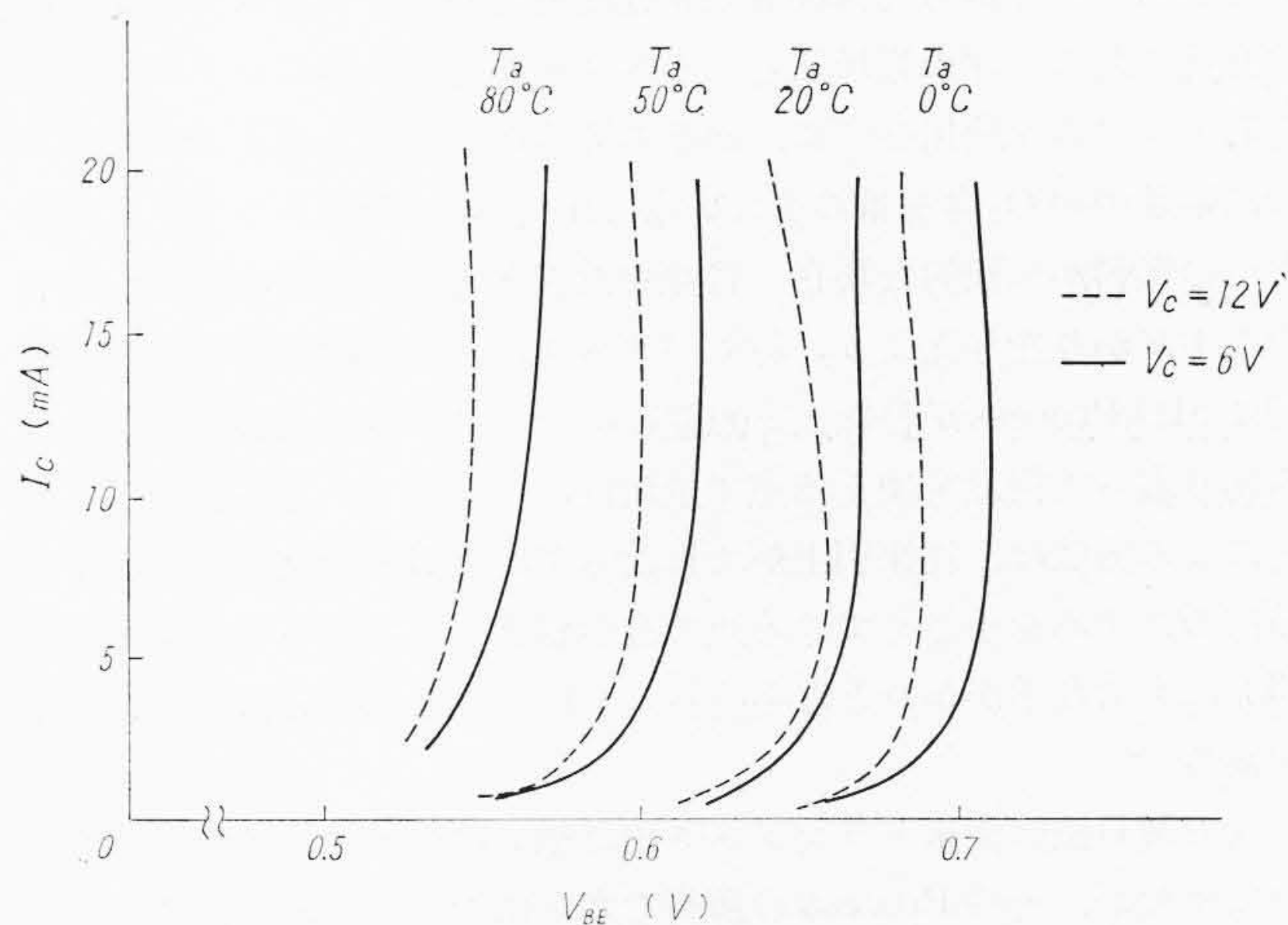
ベース領域周辺部よりコレクタ側に伸びた高不純物濃度の拡散層は必然的に C_{ob} の増加をもたらした。コレクタベース間の全容量 C_{ob} は $V_{CB}=12\text{ V}$ で平均 10 pF ぐらいであるが、このうち $1/4 \sim 1/5$ が本来のコレクタベース接合の容量であり、ほかは拡散層とコレクタベース間の容量である。コレクタ飽和抵抗が 80Ω 程度存在するため、この時定数による遮断周波数の低下は無視できず、まったく拡散層のないものに比べ 30% 程度低下している。

11. 雑音特性

第14図にTA-27の雑音指数を周波数をかえて測定した結果を示す。2 kc/s から 1 Mc/s の広い周波数にわたり、一定の shot 成分を示し、信号源抵抗およびバイアス条件を、適当に選べばこの一定レベルが 1.8 dB というすぐれた低雑音特性を示すものも少なくない。適当なバイアス条件を見いだすため雑音指数のコレクタ電圧依存性を第15図に示し、コレクタ電流および温度依存性を第16図に示す。コレクタ電圧依存性は顕著ではなく、コレクタ電流に対しては低電流レベルで雑音が低くなる傾向が見られる。温度依存性は $0 \sim 60^\circ\text{C}$ の変化に対し 2 dB 以内で、周囲温度の高い場所で使用されることの多いシリコントランジスタとしては望ましい特長である。なお参考までに記すと Ge MD トランジスタ TA-37 はこの雑音-周波数特性がさらに一定の低雑音レベルが 3 Mc/s 程度まで続き、低雑音が要求される映像増幅回路などに適している。

12. コレクタエミッタ間飽和電圧

エミッタの比抵抗は、コレクタの比抵抗に比べ、2 けたくらい低いいため、コレクタエミッタ間飽和電圧 $V_{CE}(\text{SAT})$ はコレクタ側の直列抵抗 R_{cc}' によるものと考えられる。またコレクタ比抵抗は、この範囲で温度係数が正であるため、 R_{cc}' の温度特性を示すと第17図

第18図 TA-27 エミッタベース間電圧 $V_{BE}-I_B$ 特性の温度依存性第19図 TA-27 エミッタベース間電圧 $V_{BE}-I_C$ 特性の温度依存性

のようになる。これより温度係数を求めた結果を下に記す。

$$\frac{dR_{cc}'}{dT} \approx 0.8 \sim 0.9 \Omega / ^\circ\text{C}$$

$$\frac{dV_{CE}(\text{SAT})}{dT} \left(\begin{matrix} I_C = 6\text{ mA} \\ I_B = 0.2\text{ mA} \end{matrix} \right) \approx 5 \times 10^{-3} \text{ V} / ^\circ\text{C}$$

13. エミッタベース接合の順方向特性

TA-27 のエミッタベース間電圧 V_{BE} とベース電流の関係と V_{BE} とコレクタ電流の関係を測定した。シリコントランジスタでは、周囲温度の許容範囲が広いいため V_{BE} の温度依存性は実用上問題となる

場合が多い。それゆえ上記特性に温度依存性を併(あわ)せ測定した結果を第18図および第19図に示す。

14. 電気的特性の検討

TA-27は、その特長である高いコレクタ耐圧を、電流増幅率を低下させることなく、またコレクタ抵抗 $R_{cc'}$ をあまり増大させることなく、実現するために努力が払われた。この意図はある程度満足された。すなわち $R_{cc'}$ の上限は 130Ω に達し、コレクタ飽和電圧 V_{CE} (SAT) が高く飽和スイッチに使用することは不利となったが、耐圧および電流増幅率は目標値を実現することができた。

最大コレクタ損失 $P_{C\max}$ は $R_{cc'}$ の発熱により制限され、さきに述べたように h_{FE} がまだ減少しはじめていないにもかかわらず $P_{C\max}$ によって、最大コレクタ電流も 30mA 程度としなければならなくなった(第2表参照)。

これらはいずれも広い用途を対象として特性を設計したためであり、将来用途の変化に応じて適切に変更できるものと考えられる。

電気的特性全般にわたる TA-27 の特長は、製品の各特性値が非常に集中していることである。 h_{FE} が高く、したがって雑音指数が最もすぐれている 2SC166 © に関して試作中のデータによれば 2SC166 © 良品はすべて 1kc/s の雑音指数 $5\text{dB} \pm 3\text{dB}$ 内に含まれている。また 2SC167 についても、 $6\text{dB} \pm 4\text{dB}$ に 99% が含まれるとの結果が得られている。いずれも測定条件は $V_C=6\text{V}$, $I_C=1\text{mA}$ である。 h_{FE} および V_{CEO} は原料のMD単結晶およびその後の拡散条件にも依存するが、いずれも集中度が高い。

15. 結 言

従来MD法は引上法につき検討されてきたが、この原理は水平帯溶解法、浮遊帯域法あるいはペDESTAL法などに拡張することが容易である。水平帯溶解法はゲルマニウムMDトランジスタに簡単に適用でき、ベース幅 2μ 程度の単結晶は容易に得られることがわかっている。したがって 400Mc/s 程度までのトランジスタの量産には好適である。浮遊帯域法とペDESTAL法とは、特にシリコンの場合石英ルツボを使用せずに、結晶の製造が可能である。このため、特に結晶中の O_2 含有量の少ないものが得られ、そのトランジスタ作用への影響が未検討な現在、特性の改善と新しい現象の解明への有力な手がかりを与えよう。特にペDESTAL法は装置の簡単さと短時間にMD Processが行なえる点並びにコレクタ単結晶が必用部分のみ切り取って何度も使える点で量産性にすぐれていると言える。さらにこの方法は、従来引上炉で行なっていたDipping法に比して結晶内のひずみを小さくできる点で高逆耐圧シリコントランジスタの開発に有力な手がかりとなろう。これについては現在装置を検討中である。

なおMD法は従来トランジスタ用単結晶の製法として鋭意開発されてきたが、そのProcessの解析をさらに進めて固液界面における不純物拡散の動的な取り扱いをすると、固体の溶解現象に対する溶質拡散層の厚さのさらに正しい評価ができる。またこの方法を逆に利用すると溶液中から不純物を二重拡散させる場合、一方の不純物として拡散係数のきわめて小さいものを選べば、この方法でできた結晶の断面観察から拡散源(固液界面)の位置の決定並びにその表面状態の微視的観察が可能となり、結晶の成長機構解明の有力な手がかりを与えるものと思われる。かつこの際、一方の不純物(特に拡散の遅い方の不純物)の拡散係数が既知または無視できるほど小さい場合には一方の不純物の溶液内および固体内での拡散係数を簡

単に求めうる独自の手段を提供する。この意味でMD法は半導体内の種々の不純物の拡散係数を決定する精密簡単な物理的方法と言える。

本文にも述べたようにシリコンMDトランジスタ TA-27は、従来の成長接合形またはこれと類似の構造をもつトランジスタ組立法に関する概念から完全に脱皮した新しい方法である。特にベースリードの取り付けには熱圧着法を採用し、コレクタおよびエミッタ領域の電極への取り付けにはAu-Si共晶合金を用いてろう付けを行なったため、機械的強度が飛躍的に向上した。さらに封止方法に関しても熱放散の良い磁器に取り付けた後耐湿性の樹脂中に封入したいわゆるレジンモールド形のトランジスタ構造に変えて最大許容損失、信頼度の向上などが期待できる。TA-27は従来の一般のトランジスタに比較し、素子の特性のバラッキが著しく減少し、目標とした規格に素子の特性が集中的に分布することを実験的に確かめた。この方法によって素子信頼度も格段と向上し、組立工程の自動化も容易で従来のシリコントランジスタに見られない原価低減の見通しも得られた。また、この素子はゲルマニウム低雑音トランジスタ TA-37にも劣らぬすぐれた低雑音特性をもち低電流領域での電流増幅率もほかのメサ形、プレーナ形、エピタキシャルプレーナ形トランジスタと比肩できるすぐれた特性をもつことも明らかとなった。以上の特長によって TA-27 は高い信頼度を要求される論理回路素子を始めとする工業用並びに通信機用としての広い用途が開けつつあり、量産化の研究が進めば将来汎用トランジスタとし発展する可能性も生じた。また広帯域での雑音指数が問題となる種々の用途に従来の真空管方式に代わるものとして注目されている。

本稿を終わるに当たり、終始ご指導をいただいた日立製作所中央研究所副所長、阿部部長以下中央研究所回路グループの永田、上妻両研究員、応用面のご指導をいただいた日立工場器具設計課植山研究員ならびに日立研究所11研究室小西研究員、そのほかのかたがたに厚く感謝する。

また本製品の製品化について終始熱心なご激励をいただいた武蔵工場福原副工場長以下関係者のかたがたならびに直接製品化に尽力された工製課牧、寺田両課員に厚くお礼申し上げる。また本トランジスタの開発に終始協力された中央研究所第2部東海、古寺、飯田、鈴木(道)、佐藤(隆)研究員に感謝する。

参 考 文 献

- (1) H. E. Bridgers, J. H. Scaff and J. N. Shive: Transister Technology, Vol. 1, Chap. 7 (1958)
- (2) R. N. Hall: Phys. Rev., 88, 139 (1952)
- (3) Boyd Cornelison and Willis A. Adcock: IRE Wescon Conv., Rev. Part 3, 22 (1957)
- (4) 安福, 山下: 電気化学 28, 61 (1960)
- (5) J. I. Pankove: Proc IRE, 44, 185 (1956)
- (6) I. A. Lesk and R. E. Gonzalez: IRE Trans, E. D., 121 (1958)
- (7) I. A. Lesk and Coffman: J. Appl. Phys., 29, 1493 (1958)
- (8) I. A. Lesk: J. Electrochem. Soc., 107, 534 (1960)
- (9) 阿部, 沼倉, 上田, 田内, 徳山, 河井: 電学誌 78, 1066 (1958)
- (10) 日立評論 00, 915 (昭33-0)
- (11) J. A. Burton et al.: J. Chem. Phys., 21, 1987 (1953)
- (12) S. Tauch: J. Phys. Soc. Japan, 16, 61 (1961)
- (13) S. Tauchi: ibid, 17, 102 (1962)
- (14) H. Kodera: Jap. J. Appl. Phys., 2, 212 (1963)
- (15) H. Kodera and S. Tauchi: ibid, 2, 220 (1963)
- (16) H. Kodera, S. Iida and S. Tauchi: ibid, 2, 227 (1963)
- (17) 伊藤, 白坂: 信学会トランジスタ研究会資料 (1963)