エピタキシャルトランジスタ

日本電気株式会社 佐藤 秋比古

エピタキシャルトランジスタに関してその歴史的発展のあとをたどり、従来の拡散形トランジスタの特性上の欠点とエピタキシャル化によるその改善をのべたものである。エピタキシャルトランジスタの製作、特性、応用についての現状を記述した。

1. トランジスタの発展状況

トランジスタは1948年にShockley等により発明されたが、今日までの主要な発展を見ると、原理的面ではShockleyによる接合トランジスタ(1951年)、Krömerによるドリフトトランジスタ(1954年)があり、製作技術面では成長接合(1951年)、合金接合(1952年)、拡散接合(1954年)があげられる。

ここで展望しようとするエピタキシャルトランジスタは上記の第1次進歩に対しては、やや第二次的*になるが、その製作技術的面で改良はトランジスタの特性を著しく向上させ、実用的に大きい意味をもつものである。キャリア拡散形トランジスタは最終的なトランジスタ構造とさえ考えられている。

エピタキシャルトランジスタの意義を明確にするには従来の拡散ベーストランジスタと比較する必要がある。より詳細な事項は第2節以下を参照してもらうことにし、ここではエピタキシャルトランジスタの構造、特性の概略をひとわたりのべよう。

1.1 メサ形拡散ベーストランジスタ

固体中の不純物拡散現象を利用してpn接合をつくる

* 接合そのものをエピタキシャル技術によりつくるエピタキシャル接合は製作技術面での画期的進歩と考えられるが、現在のエピタキシャルトランジスタではたんに不純物濃度が階段的に異なる結晶薄片(ウェハ)をつくるためのみエピタキシャル技術を使っている。

筆者紹介

さとうあきひこ 昭和16年東北大学電気工学科卒業後、逓信省電気試験所第4部に入所しマイクロ電子管の研究に従事、官庁組織変更により電々公社電気通信研究所勤務となる。戦後受信用真空管の研究に従事し、昭和29年より半導体の研究に移る。同33年より日本電気に転職、現在、半導体工場設計技術課長としてトランジスタ、ダイオードの設計試作業務を行なっている。昭和37年2月、工学博士。トランジスタの試験法、フック形ダブルベースダイオードの研究などを行なった。

"Epitaxial Transistor" by Akihiko Sato.

うとする企図は、現象自体の研究¹⁾²⁾の進展により1954年に初めて太陽電池に実用された。固体中の拡散現象は本来、速度の遅い現象であり、固体を相当な高温にしないと進まない。このことはトランジスタのベース層のように高周波特性が本質的にベース層内の少数キャリアの走行時間効果によりきまり、その改善のためにはベースの幅を極端に薄く(1 μ 前後)しなければならない場合に、このおそい拡散現象を利用すれば最も適切であることを示す。

すなわち1 μ のベース幅においてその1/10 μ 程度までをコントロールする場合、そのプロセスの時間が極端に短かければ慣性の大きい熱的作業をふくむこのプロセスは装置の関係上、障害にぶつかる。拡散現象を利用する場合は作業の目的により異なるが、数分程度であり、コントロール可能な領域に入っている。

つぎに拡散現象の基本的特性は、拡散面が表面に対して完全な平行性をもつことである。半導体表面の状況により大きな影響を受けるが、完全な処理がなされた面に対しては、その面を基準として一様な深さの拡散層が得られることは製造面できわめて重要である。このことは合金形トランジスタのように結晶ウェハの両面から合金接合をつくり、その両者の間隔としてベース層をきめることと比較すれば明らかである。

欠点としては、熱処理による少数キャリアの寿命時間の減少が考えられるが、理論的検討からその必要な程度を算定すれば、これは障害にならず、トランジスタの発

(a) ゲルマニウムトランジスタ

(b) シリコントランジスタ

第1図 初期の拡散形トランジスタ

第2図 拡散形トランジスタの不純物濃度分布

(a) メサ形シリコントランジスタ (b) プレーナ形シリコントランジスタ

第3図 現在の拡散形トランジスタの構造

展方向が拡散現象の利用にあることは明らかである。しかし実際にトランジスタをものにするには、関連する幾多の技術の開発が必要であり、やはり BTL の人々が先鞭をつけた。

拡散ベーストランジスタの公表³⁾⁴⁾は1956年であるが、その構造は第1図(a)(b)に示すものである。(a)はゲルマニウムトランジスタでベース層のみ拡散層であり、エミッタは蒸着合金法によっている。ゲルマニウムトランジスタはこの構造がそのまま現在に至っている。(b)はシリコントランジスタである。これは2種の不純物を逐次または同時に拡散することにより、ベース層とエミッタ層とを拡散によりつくるもので、シリコンの拡散形トランジスタの基本となっている。第2図にそれぞれの不純物濃度分布を示すが、ベース層の濃度傾斜により内部電界を生じ、キャリアをドリフトする効果が生じ高周波特性がさらに改善される。

1.2 プレーナ形拡散ベーストランジスタ

シリコントランジスタに関しては最初に BSTJ 誌上に発表されたものから一、二の重要な発展がなされた。まず第1図(b)のものでは、ベースのオーミック接触がエミッタ層を通してベース層になされているから、エミッタ・ベース間のリークageによる電流増幅率、高周波特性の低下が生ずる。この対策としてシリコン表面の酸化膜が特定不純物に対して拡散を遮断する現象、すなわち選択拡散⁵⁾を巧妙に利用して酸化膜に穴をあけて、これよりエミッタ不純物を拡散し、エミッタを区画された領域にした第3図(a)が現在のメサ形シリコントランジスタの構造になった。

つぎに大きな進歩は、いわゆる“プレーナトランジスタ”で、第3図(b)に示すものである。これはベース層自

身も選択拡散を利用して区画してつくり、エミッタ・コレクタ両結合が酸化膜におおわれている。ここで酸化膜の作用は接合部分の外界に対する保護のみでなく、積極的に表面準位を制御し再結合中心を減少させ、小電流の h_{FE} 特性、低周波の NF を改善させている。コレクタ接合が表面で彎曲することによって、降服電圧が低下する不利⁶⁾もあるが、最近大部分のトランジスタがプレーナ形に移行しつつある。

1.3 エピタキシャルトランジスタ

トランジスタのコレクタ領域は、電圧印加状態ではコレクタ側にのびた空乏層と、これにつらなる金属電極までの間のオーミック抵抗領域とからなっている。このオーミック抵抗領域は、トランジスタとしては本質的には全く必要のないものである。しかし製造上はなくすこともできないから、比抵抗の低い不純物濃度の大きい結晶を基体にして使えばよいが、コレクタキャパシタンス、コレクタ耐圧の点から通常 0.1Ω ないし数 Ω にえらばれる。この比抵抗のかかなり高いオーミック領域の存在は第3節に詳述するように、トランジスタの特性に相当な悪影響を与える。

この点に注目して Early はすでに1954年に $pnip^+$ あるいは $npin^+$ トランジスタ⁷⁾の着想を発表している。すなわちコレクタの電気的特性は主として不純物濃度の小さい高比抵抗の i 層の特性できまり、 p^+ あるいは n^+ 層は低比抵抗層でたんに電極接続の便宜のみに存在する。この着想はここで展望しようとするエピタキシャルトランジスタにより、完全に実現された。

エピタキシャルトランジスタは、半導体基体(サブストレイト)の上に、 10μ 前後の薄い層(エピタキシャル層)を気相から成長せしめた結晶ウエハを使って通常の拡散法により、拡散ベーストランジスタを形成させたものである。したがって第4図に示すようになる。サブストレイトとしてはできるかぎり低い結晶を用い、一方エピタキシャル層はトランジスタの特性に適合するような比較的高い比抵抗にする。

このエピタキシャル化はゲルマニウム、シリコントランジスタ両方に可能であり、とくにシリコンプレーナエピタキシャルトランジスタは、トランジスタとして終局的構造であると考えられている。

なおエピタキシャルトランジスタは1960年 BTL の

第4図 エピタキシャルシリコンメサトランジスタ

Theurere 等⁸⁾によって発表されてから、1961年にはすでに商品化され始めた。

2. エピタキシャルトランジスタの製作法

エピタキシャル層はサブストレイト上に気相から物質がデポジットし、結晶格子構造が同一になるように配位されて結晶が成長する現象、エピタキシャル成長 (Epitaxial Growth) を利用して形成される。合金法の場合における再結晶層あるいは拡散法による拡散層においては、その比抵抗は偏析係数、あるいは拡散係数により、その濃度の制御は任意にできないこと、また不純物補償形 (基体半導体の不純物濃度の上にさらに不純物を追加して形の変換を行なうという形式) であることに對し、エピタキシャル成長では気相中の不純物の種類、および濃度を制御することによって、相当広範囲の不純物濃度を有する、また補償形でないエピタキシャル層が得られる。厚さも数 μ という薄い層でも、簡単にできる点に実用的な意義が大きい。

2.1 エピタキシャル成長

エピタキシャル成長の方法としては、半導体装置への応用という点ではもっぱら disproportionation 反応法 (不均等化反応) および還元法が用いられている。

disproportionation 反応法

この反応は化合物が低原子価のものと高原子価のものとに分解する反応で、代表的反応式は

Xはハロゲンで、普通よう素 I_2 が多く用いられる。上記の反応は可逆反応で、高温では左に、低温では右に進む。開管式と閉管式とがある。第5図は開管式の例である。キャリアガス H_2 により、よう素蒸気が右方へ運ばれ、原料シリコンと反応して SiI_2 となり、さらに、右側において反応式の右側に進む反応により、Siと SiI_4 と

第6図
Ge disproportionation 反応
(閉管式)

に分解する。Siはサブストレイト上にエピタキシャル成長する。原料の利用効率を考えると、 SiI_4 は H_2 とともに開管から出て行くから、1/2しか析出利用されていない。しかし、開管であるから操作それ自体は量産的である。

閉管式⁹⁾について第6図により説明する。原料GeとサブストレイトGe単結晶、および適量の I_2 とを真空封入して所定の温度分布の炉に保持しておく。高温領域で生じた GeI_2 は拡散、対流により低温領域に運ばれ、ここでGeがサブストレイト上に析出する。低温領域には次第に GeI_4 がたまっていくが、同様に拡散、対流によって高温領域に移動する。高温では反応式に示すように原料はエッチされ GeI_2 を生ずる。かくて循環的にこれらの反応が継続され、次第にサブストレイト上に析出される。結果的には一定量の I_2 が循環して、原料GeからサブストレイトGeへの輸送析出が行なわれることになり、原料利用効率が開管式よりよい。

disproportionation法の長所は、かなり低い温度でエピタキシャル成長ができるから、結晶中の不純物の相互拡散、塑性変形による転位の発生がないこと、サブストレイトとして高温に保てない物質にも応用できることである。

還元法

商業的なトランジスタ生産においては、ほとんどこの

↑ 第7図 Si 水素還元法

← 第5図 Si disproportionation 法 (開管式)

↑ 第 8 図 成長速度と原料濃度

第 9 図 Si エピタキシャル層内の不純物分布 →

第 10 図 エピタキシャル層内ドーピングの機構

方法によるエピタキシャル層を利用する。主要な反応はつぎのとおりである。

通常 (1) (2) の反応が多く用いられる。この反応では Si 1100~1300°C, Ge 800~900°C で行なわれる。第 7 図は (1) の反応による装置の原理図である。寒剤で冷却した SiCl_4 に精製した水素を通し、飽和した SiCl_4 蒸気を高温に保たれた Si のサブストレイト上に送り成長させる。

不純物のドーピングを制御するには SiCl_4 の中に PCl_3 あるいは BBr_3 を計算量だけ加えるか、または別々の水素で送るかして、それぞれ n 形、p 形ができる。この反応の長所は原料が液体であるから、水素中の原料濃度や不純物濃度が容易に制御できることである。最近、再現性を上げるためにいろいろ工夫がなされているが、 H_2 を SiCl_4 中を通さず、その上を流すだけの方法が、気相中の SiCl_4 の含有量や SiCl_4 液面の温度などが一定になるため再現性がよいといわれている¹²⁾。Si の析出速度は、主として H_2 中の SiCl_4 含有量によりきまる。したがって SiCl_4 の温度を変えて飽和蒸気圧を適当に保つことで、第 8 図に示すように調節できる¹⁰⁾。

2.2 エピタキシャル・ウエハの性質

Ge および Si の単結晶はそれぞれ 600°C, 1000°C 以上で塑性変形をし、結晶面に滑り転位が発生する。従来のように融液から単結晶をつくる時には可塑領域をかなり長時間にわたって通過するから、(111) 面で $\langle 110 \rangle$ 方向にならぶ転位が発生するが、エピタキシャル成長法は融点より数百度も低い温度で成長させることができるから、前者にくらべて転位の発生は少ない。また Si を石英をつぼの中で溶かして単結晶を引き上げると、Si 単結晶中には 10^{18} atom/cc 程度の酸素が含有され、ラン

ジスタ製作の各工程の熱処理によって比抵抗が変化するが、エピタキシャル成長によるものでは、酸素はほとんど検出されない。

エピタキシャル層の結晶の完全性にはサブストレイトが影響する。したがってサブストレイトとしては欠陥のできるだけ少なく、種々の研磨などによる表面の damage 層はもちろんだが、とくに酸化膜は完全に取りさらねばならない。これらが残っていると多結晶、stacking fault, 転位などの原因になる。

エピタキシャル層をトランジスタに用いる場合には、とくに薄いことが要求されるから、エピタキシャル層内の濃度分布が問題になる。これは第 9 図に示すように、diffusion tail の部分と、それに続くなだらかな傾斜部分とにわけられる。この diffusion tail はエピタキシャル層形成中の、サブストレイトからの拡散によるものである。

なだらかな傾斜部分については、その機構は明確でないが、第 10 図に示すような機構¹³⁾が考えられる。すなわち、(ii) で示すものはドーピングしたサブストレイトから不純物が外へ蒸発し、これが逆に再び析出層にドーピングされるもので、析出層が厚くなれば当然蒸発量が減少し、これによるドーピング濃度は減少する。つぎに (iii) で示すものは、サブストレイトから同様に Si も蒸発し、ドーピングガスが稀釈された形になり、析出層にドーピングされる不純物濃度は減少する。しかし析出層が厚くなると析出層自体の不純物が増大するから、この稀釈の割合は少なくなり、不純物濃度は増大し平衡値に到達する。実際の不純物濃度は (ii) (iii) の機構が合成されて、(i) のようになるとして説明される。

またサブストレイトとエピタキシャル層の境界には欠陥が集中しており、この場所の不純物の拡散係数は通常のものの数倍といわれている¹⁴⁾。

2.3 エピタキシャルトランジスタの設計¹⁵⁾

エピタキシャルトランジスタは、原理的には従来のメサ形あるいはプレーナ形などのトランジスタでコレクタの厚さを極度に薄くしたものと考えればよい。したがってエピタキシャル層、サブストレイトの厚さ、および比抵抗を決定することを除けば、その設計はとくに異なっていない。エピタキシャル層は、トランジスタが形成された最終的段階では、つぎの各領域に配分される。

- (i) 酸化膜になる領域
 - (ii) ベース拡散層の占める領域（エミッタ領域とベース領域とを合わせた領域）
 - (iii) コレクタ空乏層の広がる領域
 - (iv) サブストレイトからの拡散層の占める領域
 - (v) 残りの部分
- (i)～(iv)までの合計が最小限必要な厚みであり、(v)をできる限り少なくして抵抗増大を防止することが必要である。第11図にエピタキシャル層内の各領域を示しておく。

以上を考慮して、エピタキシャル層の厚みが決定されるが、つぎにその比抵抗は耐圧、コレクタ容量、パワーなどのトランジスタ特性からきめられる。

トランジスタとしては耐圧が高いほど、またコレクタ容量が小さいほど望ましい。これらの値はコレクタの比抵抗およびコレクタ接合の深さから理論的に、また経験的に大体の見当がつけられる。一般的に言えばコレクタの比抵抗が高いほどよい。

しかし一方、パワーの点を考慮すると、コレクタの比抵抗が高い場合は電流が増加するにつれて、コレクタの直列抵抗による損失が大になる。コレクタ飽和電圧 V_{CE} (SAT) がわるくなるほか、第3節に示す幾多の不利な点が生ずる。したがって従来のトランジスタでは比抵抗をやたらに上げるわけにはいかなかった¹⁶⁾。これに対しエピタキシャルトランジスタでは、高比抵抗のエピタキシャル層の厚さを薄くすることにより、このコレクタ直列抵抗による損失をきわめて少なくすることができるから、比抵抗をかなり高くとることができ、高周波、高出

第 11 図
エピタキシャル層内の構造

第 12 図 サイリスタ効果による特性不安定ゲルマニウムメサトランジスタ

力トランジスタにはきわめて有利である。

すべてのトランジスタをエピタキシャル化することはトランジスタの設計上、なんらの問題もなく、要は所定の比抵抗および厚さをもつエピタキシャル層が生産されるようになることである。現在のところ、いまだ結晶の完全なエピタキシャル層を一定して得る技術は確立されてない。大出力トランジスタのように素子面積が大きくなると、1 ウエハあたりのペレット数が少ないから、その中に欠陥がふくまれる確率が多くなり、特性上とくに降服電圧特性などが劣化して歩留りがわるくなる。

3. エピタキシャルトランジスタの特性

エピタキシャルトランジスタの利点を理解するには、従来の拡散形トランジスタの欠点について説明する必要がある。

3.1 直流特性

(1) 大電流および高温における不安定性

コレクタ電極が完全にオーミックでないと、この電極から少数キャリアが注入する性質があり、第12図に示す特性（サイリスタ効果）を示すことがある。これを積極的に利用したのがサイリスタ¹⁷⁾である。同図の左側に示すようにコレクタの不完全な接触部の存在により、実質的にトランジスタは pnp, npn の2つのトランジスタが合成したような特性になり、 $\alpha_{Normal} + \alpha_{Inv} = 1$ なる条件で ON 状態にうつる。 α_{Normal} は通常の pnp トランジスタの電流増幅率、 α_{Inv} はコレクタ電極がエミッタのように働く npn トランジスタのそれである。コレクタの電極からの注入は、コレクタ領域の比抵抗が低ければほとんどなくなるから、 $\alpha_{Inv} \ll 1$ となり、以上の効果はなくなる。

つぎに J. Early¹⁸⁾ が指摘したコレクタ効率 α^* がとくに温度を上げた場合に特性不安定の原因になる。コレクタ領域の比抵抗が高いとベースを横ぎったキャリアがコレクタ領域を流れるさい電圧降下を生じ、この電圧降下によりコレクタの少数キャリアがドリフトされることから、全電流は次式のようなになる。pnp トランジスタでは

第13図 局所的注入および
キャリア流線パターン

第14図 Odd Kink 現象

第15図 各種トランジスタの特性

$$I_c = I_{cp} + I_{cn} = I_E \cdot r\beta \cdot \left(1 + K \frac{\sigma_{nc}}{\sigma_{pc}}\right)$$

$$= I_E \cdot r\beta \cdot \left(1 + K' \frac{n_{\min}}{n_{\max}}\right)$$

ここで $K = (I_{cn} \text{ に対する面積}) / (I_{cp} \text{ に対する面積})$

$$\alpha = r\beta \cdot \alpha^* \quad \alpha^* = 1 + K' \frac{n_{\min}}{n_{\max}}$$

α^* は少数キャリア対多数キャリアの比できまり、温度の関数として高温では1より大きくなる。コレクタの比抵抗の低い合金形トランジスタでは $\alpha^* \approx 1$ であるが、ゲルマニウム拡散形では問題になる。シリコン拡散形では $n_i^2 = n_{\max} \cdot n_{\min}$ の関係にある n_i の値が小さいので、この現象は見られない。

上述の2つの不安定の原因は、エピタキシャルトランジスタではほとんど完全に除去される。高温での、比抵抗の低い、 n^+ または p^+ 層（サブストレイト）に対してオーミック接触の電極を得ることは、特別な工夫もなく容易であり、また仮に少数キャリアの注入があったとしても、その部分の低い移動度によってサイリスタ効果はない。また α^* についても、ほとんど1にできるからである。

(2) 飽和特性

拡散形トランジスタの $V_{CE}-I_c$ 特性で飽和領域の立上りは合金形トランジスタより相当劣っている。この V_{CE} (SAT) の高いことは、大部分コレクタ領域の直列抵抗による $I_c r_c$ なる電圧降下と見られる。しかし、この直

列抵抗 r_c はコレクタ領域の幾何学的寸法でできるようなものではない。すなわち、エミッタ電流が大きくなるとベース電流による横方向の電圧降下により、エミッタ面からの注入は一様でなく、場所によって異なる。周辺に近い部分の電流を I_{Ea} 、エミッタ中心部の電流を I_{El} とすれば

$$I_{Ea}/I_{El} = \exp \left[\frac{q}{kT} r_B (1 - \alpha_i) I_{El} \right]$$

α_i はエミッタ中心部における電流増幅率。したがって内部からの注入はなくなり、電流の増大とともにエミッタからの注入は電極周辺に集中^{19)~21)} してくる。この局部的に集中された電流はコレクタ領域に入っても、その部分の比抵抗が高い場合は第13図に示すように、その流線のパターンはそのまま変化しない。このため直列抵抗 r_c は著しく高くなる²²⁾。

またコレクタの飽和特性がなめらかでなく、第14図に示すような形になることがあり、Odd Kink²³⁾ 現象とよばれている。 I_B が増すにつれ $V_{CE}-I_c$ 特性の飽和領域の立上りが直接部分よりずれる屈折点の電流値が、高い値にずれて行く。飽和領域ではコレクタの一部は必ず順方向になるが、合金形ではエミッタに対向する全面が順方向になる。高比抵抗のコレクタ領域をもつ拡散形トランジスタではコレクタの一部のみが順方向になり、しかも飽和領域へドライブする程度などにより、その順方向になっている部分の面積および位置が移動するとしてこ

第16図 ゲルマニウムメサトランジスタの y_{21}
高周波特性

第17図 ゲルマニウムエピタキシャルトランジスタの
 β の周波数特性
(構造は全く同一、エピタキシャル層の比抵抗が異なる)

の現象は説明できる。

その他 $V_{CE}(\text{SAT})$ は温度依存性
がかなりあり、温度が高くなるにし
たがい $V_{CE}(\text{SAT})$ は高くなるので、
実用上大振幅動作などに悪影響をお
よぼす。

上述の欠点は、エピタキシャルト
ランジスタではエピタキシャル層の
厚さを不必要に大きく取らないかぎ
り、著しく改善される。

(3) h_{FE} の電流特性

I_c 対 h_{FE} 特性について考えると、
メサ形トランジスタでは小電流およ
び大電流で h_{FE} が低下する。小電流
における低下は、とくにシリコント
ランジスタではエミッタ接合空乏層
内の再結合中心によるものと考えら
れ²⁴⁾、大電流における低下は(2)に
のべたエミッタ周辺に注入部分が局在するためと考えら
れる。プレーナ化により前者が、エピタキシャル化によ
り後者が改善されるとすれば、小電流から大電流まで
 h_{FE} の平坦な特性をシリコンエピタキシャルトランジスタ
で実現できるはずである。第15図は概念的にこれらの
改善方向を図示したものである。

3.2 高周波特性

前述の飽和特性は直流特性であるが、同じような事情
が高周波で生ずる²⁵⁾。第16図は $V_{CE}-I_c$ マップ上に
 y_{21} 一定なる曲線をえがいたものである。この図で点線
で示される稜線を測定周波数を変えて求めると、同図
(b)のようになる。同図には比較のため基体結晶に低比
抵抗結晶を用いた例もあげてある。このように直流的飽
和領域に到達する以前に y_{21} が制限される理由は明確で
ないが、コレクタが順方向にバイアスされるのに走行効
果による時間遅れがあること、またベース抵抗のためエ
ミッタ周辺から注入がおこる現象が、交流的にも影響す
るなどが考えられている。

エピタキシャルトランジスタで h_{fe} の高周波特性をと
ってみると第17図のようになる。エピタキシャル層の
比抵抗の低い場合 h_{fe} はほとんど平坦であり、比抵抗の
高い場合でも h_{fe} の最大になる電流値は測定周波数によ
り移動することは少ない。

3.3 スイッチング特性

拡散形トランジスタのスイッチング動作においては電
流が増大した場合に異常特性を示す。第18図に蓄積時間
 t_s と I_c との関係を示してあるが、拡散形では一度下
ってから再び上昇し、MADT (合金形についても同様)

第1表 エピタキシャル化およびプレーナ化による特性の改善(Fair Child 社)

	メサ形 2 N 706	プレーナ形 2 N 708	エピタキシャルプ レーナ形 2 N 913	
T_{stg}		300°C	300°C	
T_j		200°C	200°C	
P_c	1W25°C(スケール)	1.2 W	1.2 W	
V_{CE0}	25 V	40V	40V	
V_{EBO}	3 V	5V	5V	
	Min Typ Max	Min Typ Max	Min Typ Max	条 件
h_{FE}	20	30 120	30 120	$I_c=10\text{mA}$, $V_{CE}=1\text{V}$ $I_c=500\text{mA}$, $V_{CE}=5\text{V}$ $I_c=0.5\text{mA}$, $V_{CE}=1\text{V}$
$V_{CE}(\text{SAT})$	0.3V 0.6V	0.4V	0.4 0.7V	$I_c=10\text{mA}$, $I_B=1\text{mA}$ $I_c=2000\text{mA}$, $I_B=20\text{mA}$
h_{fe}	2.0 4.0	3.0	3.0	$I_c=10\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$, $I_c=20\text{mA}$ $f=100\text{Mc}$ "
C_{ob}	5.0 6.0Fp	6.0pF	6.0pF	$V_{CB}=10\text{V}$
I_{CBO}	50mμA	2.5mμA	2.5mμA	$V_{CB}=10\text{V}$ $V_{CB}=20\text{V}$
T_s	16 60ns	15ns	20ns	$I_c=I_{B1}=I_{B2}=10\text{mA}$ $I_c=I_{B1}=I_{B2}=20\text{mA}$
T_{on}		40ns ($I_c=10\text{mA}$, $I_{B1}=3\text{mA}$, $V_{BE}=-2.00\text{V}$)	40ns ($I_c=200\text{mA}$, $I_{B1}=2I_{B2}=40\text{mA}$)	
T_{off}		70ns ($I_c=10\text{mA}$, $I_{B1}=3\text{mA}$, $I_{B2}=1\text{mA}$)	40ns ($I_c=200\text{mA}$, $I_{B1}=2I_{B2}=40\text{mA}$)	

と著しく違った特性を示す。この原因としては、コレク
タ領域のキャリア蓄積効果が大電流で顕著になるためと
考えられている²⁶⁾。エピタキシャルトランジスタでは全
く MADT, 合金形トランジスタと同じ傾向を示す。エ
ピタキシャル化による特性の向上を示すために、同系統
のトランジスタについて特性比較した第1表をかがけて
おく、また第2表は国産トランジスタについての改善例
である。

第2表 国産トランジスタ改善例

	メサ形 2SC63	エピタキシ アル形 V79	
	Min Typ Max	Type	
h_{FE}	15 40		$V_{CE}=1\text{V}$, $I_c=10\text{mA}$
$V_{CE}(\text{SAT})$	0.3 0.6V 0.15 V		$I_c=10\text{mA}$, $I_B=1\text{mA}$
f_T	200 400 Mc	500 Mc	$V_{CE}=10\text{V}$, $I_c=10\text{mA}$
C_{ob}	4.5 pF	3.5 pF	$V_{CE}=10\text{V}$
T_s	60 ns	20 ns	$I_c=10\text{mA}$, $I_{B1}=I_{B2}=1\text{mA}$
T_{on}	70 ns	37 ns	"
T_{off}	110 ns	40 ns	"

第18図 スイッチング特性

第 19 図 エピタキシャルトランジスタを用いた
垂直偏向回路例 (Fair Child)

4. エピタキシャルトランジスタの応用

4.1 概 要

エビタキシャルトランジスタは従来の拡散形トランジスタの特性をよりよくしたものであるから、回路設計上なら根本的変革は当然なく、そのまま置換え得る。その価格が低減できれば最も普通なトランジスタになってしまうものである。しかし現状としてはその特長を生かす用途として、まず高速スイッチ、高周波電力増幅、高周波増幅、および周波数変換、高周波高電力スイッチなどが考えられる。

(1) 高速スイッチング

矩形波伝送でその波形をくずさないためには t_r , t_s , t_f が小さいことが要求される。このスイッチタイムの減少は、高周波特性のよい拡散形でライフタイムキラーを拡散させることで、小電流の範囲内では従来でも可能であった。しかし、比較的大きい電流（数 100 mA）のスイッチは、エピタキシャルトランジスタで初めて可能になった。

シリコンおよびゲルマニウムエピタキシャルトランジスタ

スタ両者間で比較した場合は、とくに小信号スイッチングでは I_C - V_{BE} 特性の立上りが早いことが要求されるので、後者が有利である。しかし、それ以外のとくに信頼性が要求される場合は前者がまさる。

(2) 高周波電力増幅

電力増幅では、飽和特性の立上りがよいことが電圧利用率に関係してくる．とくに高周波のその特性が問題になり、高周波出力を制限する大きな要素であった．エビタキシャルトランジスタではこの欠点も改善され、高能率高出力が得られる．また C_{ob} を小さくし得るから、トランジスタの出力容量が小さく、高周波の同調回路の設計が容易になること、電源電圧が低下したときの C_{ob} 増加、および大振幅信号に追従する出力容量変化の同調容量に対する割合が従来の拡散形トランジスタにくらべて小さくなる．

C_{ob} が小さいために内部帰還量が減少し、出力インピーダンスは増加する。またエミッタ接地における入力信号が出力側に洩れる程度も小さくなり、AM 変調時で過変調の場合の折り返し波形の処理も楽になる。

4.2 テレビにおける応用²⁷⁾

エピタキシャルトランジスタはその高周波特性のほか、スイッチ特性としてコレクタ・エミッタ間の“オン時間”の電圧降下が小さく、その期間中のトランジスタ自体の消費電力が小さくなって、トランジスタの温度上昇が小さいという利点がある。また、とくにシリコントランジスタを用いれば高温に耐えること、コレクタしゃ断電流 I_{co} が小さいために温度安定度がよく、小形化にもなる。したがって受像機の偏向回路に適している。

昨春発表されたソニー社のマイクロテレビにもシリコンエピタキシャルトランジスタ 2SC140 が 3 石用いられ、垂直偏向出力、水平発振、水平ドライブの 3 箇所に応用されている。

第 20 図 2N918 エピタキシャル・プレーナトランジスタを用いた回路例
45Mc. Video IF (Fair Child)

水平偏向用に使うような大容量、大電流トランジスタはいまだ完成していないが、近い将来、その出現が期待される。

垂直偏向回路に用いた例を第 19 図にあげておく。この回路の出力段は普通、A 級増幅回路が用いられていたが、これを B 級にしてチョークを取ることが最近の流行になりつつある。

この場合、同極性および補極性の 2 種の回路が考えられる。補極性の場合 pnp と npn とを組み合わせるが、従来は pnp 合金形トランジスタに匹敵する低飽和抵抗の npn トランジスタの入手が困難で、これに従来の拡散形シリコントランジスタをあてると h_{fe} のコレクタ電流依存性が大きいことと、飽和抵抗が大きいために著しくアンバランスであったが、エピタキシャルトランジスタにより容易に組にできうる。

Video 出力用トランジスタに対する条件として

- i) P_c : 数 100 mW 以上
- ii) 大電圧のスイングに適すること、現在 6 インチテレビで 25Vpp, 16 インチテレビで 40~50Vpp の映像出力を得ること
- iii) 約 30c~3.5 Mc にわたる平坦な周波数特性
- iv) 増幅の直線性
- v) 高利得

などが数えられるが、従来の拡散形トランジスタでは直線性が悪く、また飽和抵抗が高いため電圧利用率の点から、必要以上に高耐圧トランジスタが要求された。この点エピタキシャルトランジスタを適当に設計することによって、特性がかなり改善された。第 20 図に使用回路例を示す。

その他、エピタキシャルトランジスタを用いる場所として音声出力があげられる。OTL 回路として Complementary の場合の npn トランジスタとして、また SE-PP 回路にシリコンエピタキシャルトランジスタを使えば run out の点でとくに有利である。

チューナ、映像 IF 回路にはもちろん高周波、高利得のエピタキシャルトランジスタが用いられる。

5. む す び

以上、主として拡散形トランジスタの歴史的発展をたどり、エピタキシャルトランジスタによる特性の改善を従来のものと比較してのべた。結果的にいえば、コレクタに関係する特性に関しては合金形トランジスタとほぼ同じ性能が得られ、しかもベース領域の優秀な高周波特性がそのまま維持されたトランジスタが得られたことになる。とくにシリコンエピタキシャルトランジスタはパワーの点からいって、今後のトランジスタの基本的なも

のといえよう。トランジスタがすべてエピタキシャル化するのには、一にかかってエピタキシャル成長技術そのものによっている。

本文ではエピタキシャルトランジスタのみに限定したので、エピタキシャル成長により接合をつくるエピタキシャル接合の応用についてはなんらふれなかった。しかしこの方面の進歩によりトランジスタ、ダイオードなどが大きく変貌する可能性もある。

最後に、本文を草するにあたり多大な援助を日本電気(株)半導体工場の黒沢、粕川、尾山、次田の諸氏に得たことをしるし、ここに感謝の意を表する。

(昭和 38 年 3 月 9 日 受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) W. C. Dunlop: Phys. Rev., 94, June (1954), 1531~1540
- 2) C. S. Fuller & J. A. Ditzenberg: J. Appl., Phys., 27, May (1956), 544~553
- 3) M. Tanenbaum & D. E. Thomas: Bell Sys. Tech. J., 35, Jan (1956), 1~22.
- 4) C. A. Lee: Bell Sys. Tech., J., 35, Jan. (1956), 23~24.
- 5) C. J. Frascch & L. Derick: J. Electrochem. Soc., 104, Sep (1957), 547~552
- 6) 中村: 昭 37 年度電気通信学会大会, s 9-8
- 7) J. M. Early: Bell Sys. Tech., J., 33, May (1954), 519
- 8) M. C. Theuerer et al: Proc. I.R.E., 48, (1960), 1642
- 9) J. C. Marinace: IBM. J., 4, July (1960), 248
- 10) M. C. Theuerer: J. Electrochem. Soc., 108, (1961), 649
- 11) J. M. Chang & B. A. Joyce: J. Electrochem. Soc., 109, (1962) 957
- 12) C. H. Li: J. Electrochem. Soc., 109, (1962), 952
- 13) D. Kahng, C. O. Thomas & R. C. Manz: J. Electrochem. Soc., 109, (1962), 1055
- 14) D. Kahng, C. O. Thomas & R. C. Manz: J. Electrochem. Soc., 109, (1962), 1106
- 15) 黒沢, 他: 昭 37 年度電気通信学会大会 s 9-1
- 16) J. M. Early: Trans. IRE, ED-6, (1959), 322
- 17) C. W. Mueller & J. Hilibrand: Trans. IRE, ED-5, Jan, (1958), 2
- 18) J. M. Early: Bell Sys. Tech. J., 32, (1953), 1271
- 19) R. Ehmeis, A. Herlet, & E. Spenke: Proc. IRE., 46(1958) 1220.
- 20) N. H. Fletcher: Proc. IRE., 45, (1957), 862
- 21) R. L. Pritchard: Proc. IRE., 46, (1958), 1152
- 22) V. H. Grinich, R. N. Noyce, & R. T. Kikoshima: IRE Wescon, Aug. 18, (1959)
- 23) S. L. Miller & R. M. Soshea: Trans. IRE., ED-8, (1961) 424
- 24) C. T. Sah, R. N. Noyce, & W. Shockley: Proc. IRE., 45, Sep. (1957), 1228
- 25) H. Rüchardt: NTZ, 15, H-7, (1962), 333
この文献はエピタキシャルトランジスタの特性について詳しい記述があり、参考になる。
- 26) J. N. Barry: Electronic Technology, 39, June (1962) 206,
- 27) Trans. IRE on Broadcast and Television Receivers, BTR-8, No. 2, July (1962)
トランジスタ回路全般について詳しいが、そのうちとくにシリコンエピタキシャルトランジスタの応用に関しては、J. A. McIntosh et al: p. 96~107