

トランジスタ

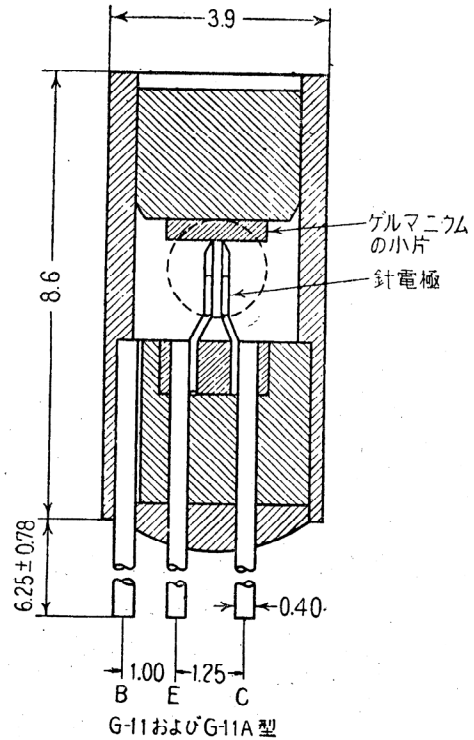
大阪大学工学部 中井 順吉

1. はしがき

今世紀はじめに真空管が発明されて当時の電気通信技術界に一大革命をもたらした。その後真空管の進歩につれて各種の応用技術が現われて今日の電子工学時代をまねいた。このように真空管の応用分野が広がるにつれて真空管に対して要求される条件はますます厳しくなってきた。その欠点とするところは高真空容器を必要とすること、熱電子を利用しているために陰極加熱用電力を要すること等である。第1の点においては高真空とするために特殊技術を要し、また最近非常に小型化されたとはいえその容器は他の回路素子に較べて大きな容積を占めている。第2の点では経済面だけではなく、多数の真空管を使用するもの、例えば電子計算機等において高温となるために小容積のところ真空管を多数収用することが許されない。このほか特殊目的に対しては機械的刺戟に弱いことが問題であり、また長寿命を保証せねばならぬ用途には特別の考慮を払って製造しなければならない。このとき忽然として現われたものがトランジスタである。

第2次世界大戦中に各国とも通信機器、特に電波兵器の研究と生産に関して非常な努力を傾注した。そのとき必要とせられた部品の1つに良好なる半導体整流器が含まれていた。真空管検波器の進歩によつて昔の鉱石検波器は影をひそめたが、真空管の必要とする陰極加熱用電力の要らぬこと、小型で取扱いが便利なこと等の利点が買われ、今日のゲルマニウム整流器が出現した。戦後においても更に研究が進められていたとき、米国のベル研究所において Schockley, Bardeen, Brattain がゲルマニウム結晶の表面電荷に関する実験を行つているときに特異な現象を発見し、トランジスタを生みだすにいたつた。そして1948年6月にその特許申請を行つている。トランジスタとは transfer resistor の中間を略したもので、入力を変化するとそれに応じて出力が変る固体抵抗器という意味をもっている。

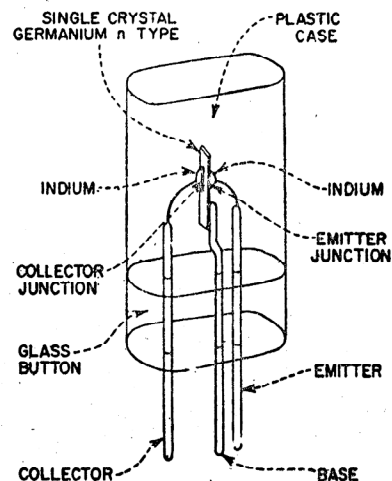
最初に発表されたトランジスタはA型と称せられるところの点接触型で、第1図のようにN型ゲルマニウムの小薄片(1mm²×0.5mm程度)の上面にタンゲステン又は磷青銅の“猫のひげ”と称せられる細い針金(直径0.05mm程度)の先端を楔型に尖がらせ、0.1mm程度の



第1図 点接触型トランジスタ

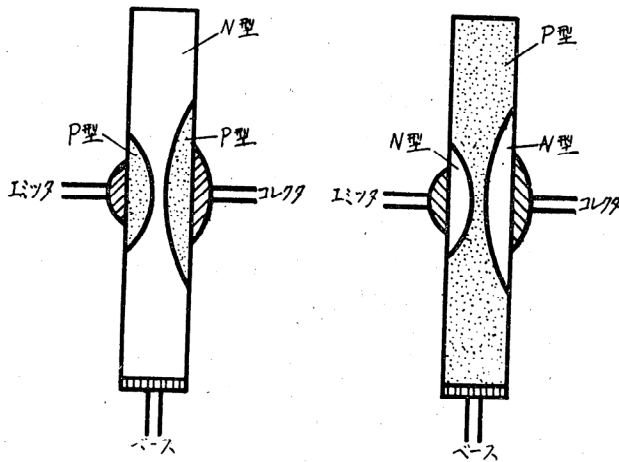
間隔で2本接触させ、下面は全面を金属電極につないだものである。2本の猫のひげのうち1本がエミッタ、他の1本は圧着ののち短時間過電流を流してゲルマニウムと半ば熔着状態にしてあつてコレクタと称する電極となる。

その後この点接触型についていろいろの研究が行われたが第2図のような接合型でもトランジスタ作用のある



第2図 接合型トランジスタ

ことが見出され、最近では特殊目的以外にはもつばら接合型が用いられている。接合型には第3図に示すように2種類ある。(a)はP-N-P型でN型ゲルマニウム薄



a) P-N-P型 b) N-P-N型

第3図 接合型トランジスタ

片の中央部を僅かに残して両側をP型化したもの(b)のN-P-N型はこの逆である。

回路的にはエミッタは真空管の陰極に、ベースは格子に、コレクタは陽極に対応する。真空管のときは格子を負電位にして使用すると格子電流は流れないが、トランジスタの場合にはベース電流が流れるために回路構成が特殊なものとなり解析も複雑となる。また真空管の場合は格子電圧による陽極電流の制御がその作用の中心であるが、トランジスタのときはエミッタ電流によりコレクタ電流を制御するという立場で考えねばならない。

2. 接合型トランジスタと動作原理

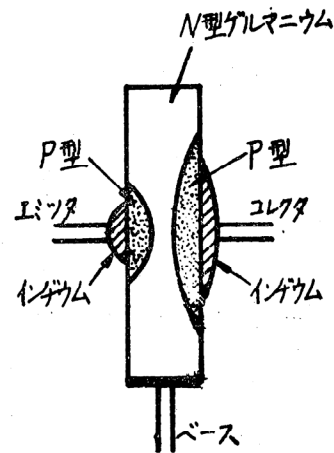
前述のようにトランジスタは点接触型と接合型の2種類に大別される。ここでは一般に良く用いられている接合型について解説する。

ゲルマニウムは第4族元素であつて原子のまわりには4個の価電子が存在する。それでゲルマニウム結晶にあつては1つの原子のまわりに他の4個が存在し、その各々との間で1つ宛の価電子を出しあつて共有し、共有結合によつて相互に結ばれている。そして同じ第4族元素の炭素同様ダイヤモンド構造をした結晶を作る。もしこの結晶の中に第5族元素たとえばアンチモンが入ると、アンチモン原子のまわりの5個の価電子のうち4個はまわりのゲルマニウム原子との間の共有結合に使われるが、あとに1個残る。この残つた電子はアンチモン原子より容易に離れ易い状態になる。それで熱的にエネルギーを付与されると結晶内を自由に動きまわり、いわゆる自由電子となり、弱い電界が作用してもその方向に流れて電気伝導を司さる。一方ゲルマニウム中に第3族元

素たとえばインジウムが入ると最近接4個のゲルマニウム原子と共有結合を行うには価電子が1個不足する。このようなところはそのまわりの電子を奪いとりに易く、この電子の欠けたところはそれに応じて順次結晶内を移動く。そこは電子の欠けたところであるから電気的には電してゆきと同じ大きさの正電荷を有するものとみなされ、正孔と呼ばれる。正孔は電界と同じ方向に流れて電気伝導に寄与する。以上のように電気伝導に寄与する荷電体に電子と正孔の2種類あるが、電子による場合をN型、正孔による場合をP型と称する。N、Pとは荷電体符号によるものである。

接合型トランジスタの作り方は大きく分けると2つある。その1つは成長法で熔融ゲルマニウム中より結晶を引上げるときに熔融ゲルマニウム中に第5族元素と第3族元素とを交互に投入してN型及びP型結晶を交互に連続して引上げる方法であるが、今日一般のトランジスタは次の合金法でもつて作られている。

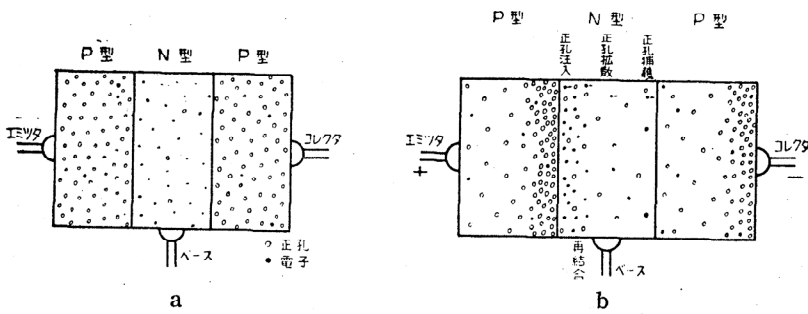
その方法をP-N-P型の場合につき説明すると、十分に精製(99.999999%以上)したN型ゲルマニウムの薄い小片を作る。この両面に第4図のようにインジウムの



第4図 P-N-P接合型トランジスタ

小塊をつけ、電気炉中で高温に加熱するとインジウムが拡散して中に入り、そこをP型化する。ただし両側から入つたP型部分が連絡する前で両者の間に薄いN型部分の残つた状態で拡散を止める。そして図のように各電極をつける。通常は後述の正孔捕集の効率を大にするためにコレクタ側の面積を大きくしてある。

P-N-P型トランジスタを模型的に書くと第5図(a)のようになる。N型領域では電子が圧倒的に多く、P型領域では逆に正孔の方が圧倒的に多い。ここに(b)のようにベースに対してエミッタには正、コレクタには負の電圧を与えると、図のように各領域にある荷電体は移動する。エミッタとベース間はP-N接合整流器としての順方向で電流は流れ易い。それはエミッタ中の正孔が



第5図 接合型トランジスタの動作の説明

両者間の境界部で堰層と称せられるところを容易に通過してベース中に流れ込むため、これを正孔注入という。正孔とは逆にベースよりコレクタに向つて電子が流入するが、正孔注入に較べて非常に僅かなものとなつている。コレクタとベースとの境界部では電界的作用によつて荷電体は殆んど存在しなくなり電流は流れ難い。すなわち整流器としての逆方向である。ところでエミッタよりベース中に注入された正孔の行方について考えると、ベース中に入つてより拡散して進行してゆく。ベース中には多くの電子が存在するので、正孔と電子とが再結合、つまり電子の欠けたところに電子がはまり込み、正孔は消滅する。しかし正孔はベース中に入れば直ちにすべて再結合して消滅するのではなく、その機会の問題があつて、非常に短時間ではあるが正孔は寿命を保ち、ベース中を拡散してゆく。ベースの厚さが充分薄いと大部分の正孔は拡散してコレクタ領域に達し、またコレクタには負電圧が与えられているのでコレクタにより捕集されて流入する。作り方が良ければ注入正孔のうち0.95

~0.98までがコレクタに到達する。それでエミッタ電流をかえると、それは注入正孔が変ることであり、コレクタに流入する正孔数が変化してコレクタ電流が変ることになる。したがつて接合型の場合には電流増幅率は1より小さい。(点接触型の場合には2~3)しかし電圧増幅率は1より大きい。それはエミッタ側は順方向、コレクタ側は逆方向であつて、

電流の流れ易いところで僅かの電圧変化で大きい電流変化を与え、それと同程度の電流変化が電流の流れ難いコレクタ側に生ぜしめられるからである。

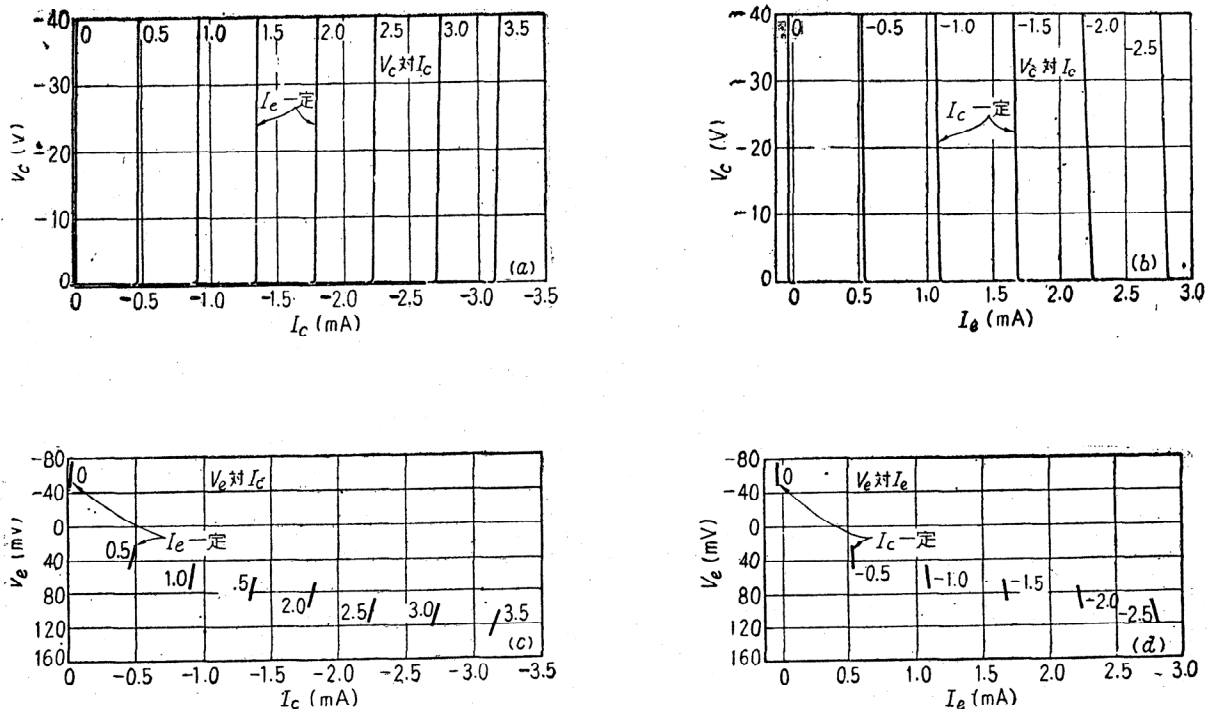
N-P-N型の場合にあつては電圧のかけ方は上と逆で、ベースに対してエミッタには負、コレクタには正の電圧を与える。

3. 接合型トランジスタの特性

現在最も多く使われているP-N-P接合型トランジスタの静特性の代表例は第6図のごとくである。図中の記号は次の諸量を示している。

- V_e = エミッタ電圧 I_e = エミッタ電流
- V_c = コレクタ電圧 I_c = コレクタ電流
- (ベースに対し) (流入方向を正)

$V_c - I_c$ 特性をみるとこれは五極真空管の陽極電圧電流特性に似ている。このときのパラメータは I_e であるが、 I_e の等量の変化に対して $V_c - I_c$ 特性は等間隔になつている。すなわち入力対出力特性は直線性である。



第6図 接合型トランジスタの特性の例

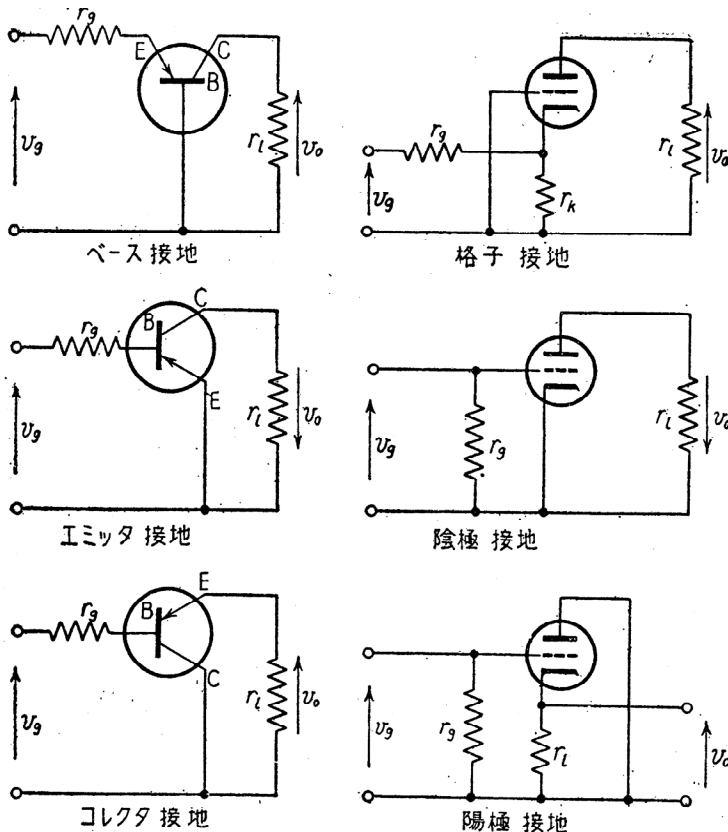
トランジスタはゲルマニウムという半導体を用いた素子である。半導体は温度が高くなると電気伝導に寄与する電子あるいは正孔の数が増加して電気伝導度が大きくなる。この傾向は金属の場合とは逆である。ゲルマニウムの場合には荷電体の易動度の問題があつて特殊な傾向があるが、とにかくこの温度による影響が著しい。それでトランジスタの取付位置は高温となる真空管や変圧器等のそばを極力避け、周囲温度が 50°C を超過せざるよう留意しなければならない。またトランジスタの脚を直接導線とハンダ付けするときには脚のもとの方を平らなペンチで挟み、ハンダの熱を逃がしてトランジスタの温度が上らぬように注意して行う必要がある。

トランジスタの基本回路

真空管増幅器の基本回路はその接地方法により格子接地、陰極接地、陽極接地に区分される。トランジスタの場合にあつても同様であつて、第7図は両者の基本回路間の対応関係を示したものである。真空管の陰極、格子陽極はそれぞれトランジスタのエミッタ、ベース、コレクタに対応する。接合型トランジスタの基本回路の特性の概略を記すると次のようになる。

(1) エミッタ接地回路

通常のP-N-P接合型トランジスタの場合にあつては入力抵抗は数百 Ω の程度でベース接地回路にくらべて大きい。出力抵抗は数十 $\text{K}\Omega$ である。電圧増幅率は数百の



第7図 トランジスタ回路と真空管回路との対応関係

程度のものとなりベース接地回路より大きい。電圧の位相は反転する。この回路は入力抵抗が比較的大きく、利得も大であるので、利得の大きいことを望む場合に専ら用いられる。

(2) コレクタ接地回路

他の回路に較べて入力抵抗高く出力抵抗が低い。入力抵抗は負荷抵抗が数 $\text{K}\Omega$ であれば数 $\text{M}\Omega$ あるに対して出力抵抗は数十 Ω にすぎない。ただし電圧増幅率は1より小さく、入出力の位相は同じである。これらの特性は真空管回路のカソード・フォロワの場合と同じである。エミッタ電源電圧が数V以下におさえられるので出力電圧が飽和し易い欠点がある。

(3) ベース接地回路

この回路においては入出力電圧は同じ位相である。よつて位相反転を行わずに増幅を行いたい場合には都合がよいが、入力抵抗が接合型では数十 Ω で小さく、出力抵抗は数百 $\text{K}\Omega$ と大きく、この方面から用途が制限される。

以上の基本回路をもとにして増幅器、発振器、開閉回路等の数多くの応用回路が生れて実用されている。

4. 高周波トランジスタ

接合型トランジスタの動作を考えるとそのなかにベース中をエミッタよりコレクタまで正孔が拡散するという機構が入っている。この正孔の拡散は真空中における電子の運動のように敏速にはゆかない。拡散には或る程度

の時間を要し、ベース部分の厚さは一般には一様でないので、同時に多数の正孔がエミッタより注入されてもコレクタ到達時間にはむらを生ずる。そのため接合型トランジスタは高周波用には適しない。この観点よりすればN-P-N型ならばベース中を拡散するのは電子であつて正孔よりも速いからまだましである。今1つ問題となるのはコレクタ静電容量と称するものである。すなわちコレクタとベース間には逆方向電圧が与えられているので抵抗は非常に大きい。それで両者間の静電容量が問題となり、高周波電流がこのコレクタ静電容量で短絡され、トランジスタ作用が失われる結果をまねく。

以上の2つの問題を解決するように工夫されたものが高周波トランジスタである。ベース間隔を極めて小さくして均一とした普通型、特殊な作り方をした穿孔型や表面堰層型、成長結合型、また電界によりベース中での正孔速度を大ならしめるようにしたP-N-I-P型等がある。このほかベース電極が2つある四極トランジスタも高周波用を目的としたものである。

5. あとがき

以上は一般に増幅発振用として実用に供されている接合型トランジスタを中心として動作原理および基本回路について記したのであるが、N型ゲルマニウム中を流れる電子流の通路を両側面につけたP型電極に電圧を与えて制御して五極真空管同様の特性を得るようにした単極トランジスタ、またP型とN型との接合部に逆電圧を与えておき、光を投射すると光量に応じて電流が変わるところのフォト・トランジスタがある。このほかゲルマニウム応用素子としてはダブル・ベース・ダイオードがあり、

簡単な回路でもつて容易に開閉回路が作られるので電子計算機、電子交換機等への利用が行われている。

このようにトランジスタは発明されてより日なお浅いが、その製造技術や応用技術は急速に発展し、真空管に代るものとして、またその独自の応用分野を開拓している。将来は受信管程度のところはトランジスタにより置換えられる形勢にあるが、真空管は真空管としての特長目的に向つて研究開発が行われ、一方トランジスタもトランジスタとしてその道をひらいてゆくものと考えられる。

電子管の工業応用

大阪大学工学部 菅田 榮治・裏 克己

緒言

初期の電子管は、主として通信関係に用いられたが、信頼性や電力容量の関係で工業の他の分野には余り用いられなかつた。しかし技術の進歩によつて、種々の用途の電子管が考案、開発されて、その速応性と大きな制御性は工業の各方面への応用を促すに至つた。

本文では現在電子管のどのような種類が工業の各方面に用いられているかを述べ、それによつて将来の動向を洞察して見たい。

1. 電子管の種類

現在、工業に应用されている電子管の種類は大別次の如くである。

一般真空管：二極管，三極管，多極管

電子ビーム管：ブラウン管，電子ビーム切替管

光電管及び二次電子管：光電管，光電池

二次電子増倍管，記録管

放電管：水銀整流管，熱陰極格子制御管（サイラトロン），定電圧放電管，リレー放電管，ステップ放電管，ガイガー・ミュラー計数管

X線管

一般真空管は、あらゆる電子装置に含まれ、整流、増巾発振、検波、切替等基本的な性質を有することは周知の通りである。この型で、電極材料等を極度に吟味して、設計された高信頼管及び微小電流測定用真空管も、

工業用電子管として用いられるようになった。

電子ビーム管は、電子流を適当な電極系によつて、空間的に限られたビーム状に射出し、これを電磁場で偏向して所要の場所のみ電子が流れ込むようにしたものである。ブラウン管及びその変形であるテレビ受像管の用途は非常に広い。たとえば点光源を二次元的に高速で移動するいわゆるスキャナーは将来性がある。電子ビーム切替管は電子ビームと偏向電極の組み合わせによつて、切り換え、電流制御、計数を行うものである。電子計算機、電子交換機に用いられ、現在新しい型のものが次々に考案されている。

光電管は、光信号を電気信号に変換する光電材料を用い、二次電子管は物質の二次電子放射を利用して、二次電子による増倍や、絶縁物上に電気信号を蓄えるもので、普通この両者が組合されていることが多い。たとえばテレビのカメラチューブ、X線蛍光増倍管、光増巾管、ノクトビジョン等新しい分野への応用がある。

放電管は、以上の管での電荷の運び手が電子であるのに対して、水銀蒸気、その他のガスを封入して電子以外にイオンもその運び手になつている。その最大の特徴は、イオンにより電子の空間電荷効果が消されて、比較的小さい電圧で、大きな電流が得られることである。サイラトロンは格子を封入した熱陰極放電管の商品名(G. E.)であるが、放電開始を格子で制御することのできる一種のスイッチで、陽極電源が交流のときには任意の位相での点弧の制御が可能である。

サイラトロンの偽作原理を簡単に説明すると負の格子