

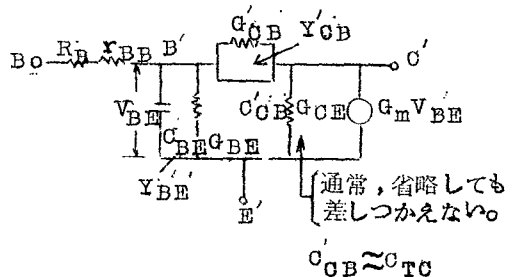
氏名(本籍)	阿部 樽(宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第175号
学位授与年月日	昭和44年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電気及通信工学専攻
学位論文題目	接合形トランジスタの等価回路

(主査)

論文審査委員 教授 西沢 潤一 教授 真野 国夫  
教授 松尾 正之

## 論文内容要旨

種々のトランジスタの等価回路のうちで広く用いられているのは、T形等価回路と $\pi$ 形等価回路である。トランジスタをベース接地で用いるときにはT形等価回路が使い易いが、実際トランジスタを増幅素子として使用するときにはベース接地よりもエミッタ接地として使用することが多い。エミッタ接地の場合には、ベース電流が増幅されてコレクタ電流となると考えるよりも図1示すように、エミッタ・ベース間に印加された電圧 $V_{B'E}$ によってコレクタ電流が制御されると考え、相互コンダクタンス $G_m$ を用いて考える方がトランジスタの動作を考える上にも大切である。エミッタ接地の $\pi$ 形等価回路はベース接地のT形等価回路に比



べて電流増幅率 $\alpha$ の位相回転が問題になる周波数での精度が悪いが、真空管と簡単に対応がつく上に、その等価回路定数はミラー効果を利用することなどによって、インピーダンスブリッジを用いて比較的簡単にしかもかなり正確に測定できる。また実際のトランジスタ回路の計算においても、入出力インピーダンスの算出や中和回路の計算などにも便利であるという利点を持っている。このように実用的には $\pi$ 形等価回路が重要であるが、 $\pi$ 形の等価回路定数がどのような周波数依存性を示すかについては卑近な重要問題であるにもかかわらず検討されていなかった。まず $\pi$ 形等価回路の等価回路定数の周波数依存性が $\alpha$ の位相回転に関係していることを明らかにした。したがって等価回路定数の周波数依存性を $\alpha$ の位相回転角が1ラジアンになる周波数 $f_T$ を基準周波数として、 $f/f_T$ の関数として表わすならば、 $\pi$ 形等価回路の等価回路定数が一定定数として使える限界周波数 $f_\alpha$ をすべてのトランジスタに共通の量として表現できる。図1の等価回路においてコンダクタンス成分は周波数とともに増加し、容量成分は周波数とともに減少するのであるが、 $G'_{B'E'}$ 、 $G'_{C'B'}$ は $f_T$ でも低周波値から3%程度のずれしか示さないし、 $G'_{C'E'}$ は $f/f_T=1$ のときに10%程度のずれを示すが、トランジスタの通常の動作状態においては $\omega G'_{C'E'} \gg G'_{C'E'}$ であり、また変換コンダクタンス $G_m$ の絶対値 $|G_m|$ のずれは $f \leq f_T$ で2%以下である。ただし、 $G'_{B'E'}$ だけは非常に大きな周波数依存性を示し、例えば $\alpha_0=0.98$ の場合、 $f/f_T=1/20, 1/10, 1/4$ のときに $G'_{B'E'}$ のその低周波値 $G'_{B'E'_0}$ からのずれはそれぞれ3, 10, 50%である。 $\alpha_0$ が大きくなると $G'_{B'E'_0}$ の値が小さくなるからずれの程度も大きくなる。ただし、一般には $f_T$ 以下の周波数でも $\omega G'_{B'E'} > G'_{B'E'}$ である( $\omega$ :角周波数)からその様な周波数範囲においては $\pi$ 形等価回路の定数は $f_T$ までは一定定数として用いることができる。以上の検討はキャリア拡散形トランジスタの場合についてであるが、キャリアドリフト形トランジスタの場合にもほぼ同様のことがいえる。

ところで、トランジスタのベース中を伝達される信号のしや断周波数は、走行する少数キャリアの位相回転( $f_T$ を基準周波数とする)と粗密振幅の減衰( $f_\alpha$ を基準周波数とする)との両方に関係しているから、絶対値も減少しているような周波数領域では、 $f_T$ 、 $f_\alpha$ に対する変化の割合を示した。 $\alpha$ の特性を振幅特性と位相特性とに分離して考える必要性が西沢らにより示され、西沢の近似式として、

$$\alpha \approx \alpha_0 \cdot \exp(-\omega^2 D_{BW}/v_B^3 - j\omega W/v_B)$$

(ただし、 $\alpha_0$ : $\alpha$ の低周波値、 $\omega$ :角周波数、 $D_B$ :ベース中の少数キャリアの拡散係数、 $v_B$ :ベース中の少数キャリアのドリフト速度、 $W$ :実効ベース幅)が提案されたが、これをもとにしてキャリア拡散形トランジスタでも使用でき、 $\alpha$ の持っている物理的意味を明確に表現

できる近似式として、

$$\alpha \approx \alpha_0 \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( f / f_{\alpha} \right)^2 - j f / f_T \right\}$$

を提案した。これは  $f \leq f_T / 2$  では3%以下、 $f_T$  では20%の誤差で使用することができる。この外にもT形及び $\pi$ 形等価回路の等価回路定数の近似式とその精度及び適用周波数範囲などについて詳しい検討を行った。

ついで各種のトランジスタについて、これら等価回路定数の測定を行い、特に高注入状態では、従来の低注入状態における等価回路をそのまま用いることにすると、その等価回路定数がどのような修正を必要とするかを示した。例えばトランジスタの高周波特性の良さを決定する重要なパラメータの一つであるコレクタ・ベース間の容量  $C_{CB}$  は図2のような電流依存性を示し、かなり大きな修正を必要とすることを示し、

このような電流依存性はC.T.Kirkの提案した理論では定量的に説明できず、ベース幅変調効果による容量成分によるものであることを明らかにした。また高注入動作状態における  $f_{\alpha}$ 、 $f_T$  の低下の現象についても、従来良く用いられているKirkの理論があやまりであることを指摘した上で各種のトランジスタの  $f_{\alpha}$ 、 $f_T$  の電流依存性の原因を検討した。キャリア拡散形トランジスタにおいては、 $C_{CB}$  の増

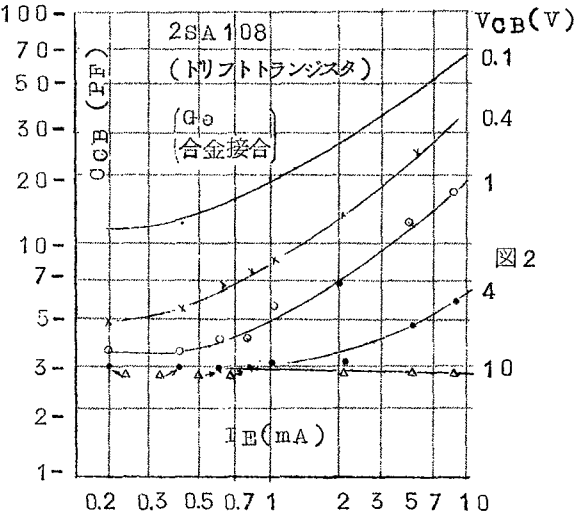
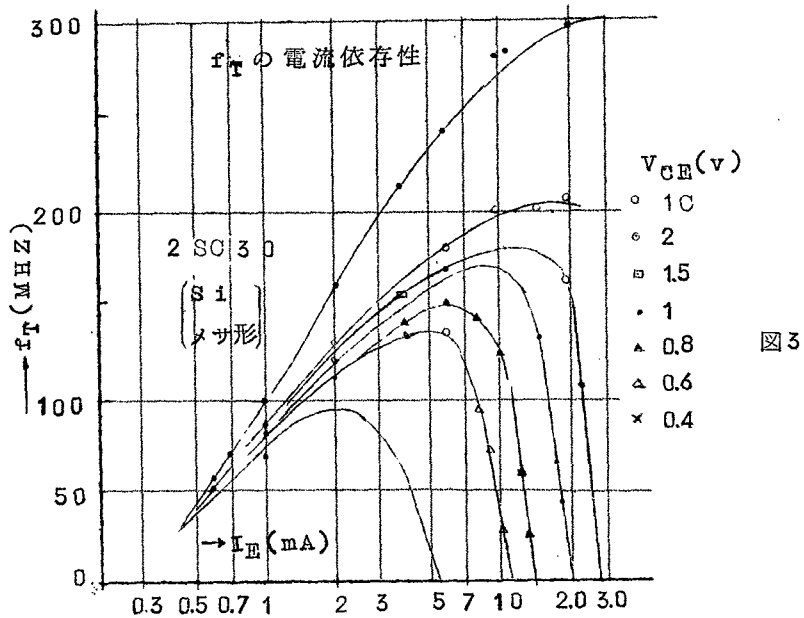


図2

加が顕著であるような高注入状態においても  $f_T$ 、 $f_{\alpha}$  の低下がほとんどみられないのはそもそもベース領域中の走行時間が大きいため  $C_{CB}$  による影響が効かないためであるが、これがキャリアドリフト形トランジスタになるとベース中の走行時間が短いため  $C_{CB}$  による影響が大きくなるため  $f_{\alpha}$ 、 $f_T$  の低下が表われる。一方、メサ形、三重拡散形、エビタキャリットランジスタなどのようにコレクタに高抵抗層を有するトランジスタでは、例えば図3に示すような非常に大きな電流依存性を示すが、 $f_T$ 、 $f_{\alpha}$  が急激に低下するような電流領域ではコレクタ・ベース間の接合がすでに順方向バイアス状態になっており、 $C_{CB}$  はほとんど順方向の拡散容量の値となり、電流とともに急激に増加することが、 $f_T$  の急激な低下の原因であることを実験的に明らかにした。

コレクタに高抵抗層を有することは高耐圧のスイッチング用あるいは高周波用として重要なこ



とであるが、こゝではコレクタ高抵抗層の厚さと  $W_{CC}$  だけが異なり他の特性はほとんど同一のトランジスタを用いて、 $W_{CC}$  の大きさがトランジスタの動作特性に及ぼす影響を検討した。 $W_{CC}$  の大きいほど耐圧が大きくとれ、スイッチング用としては有利であるが逆に飽和電圧  $V_{CE, sat}$  が大きくなり、スイッチングの ON 電圧が大きくなってしまふことを示し、また高周波特性についてもコレクタ・エミッタ間印加電圧が小さいような動作領域では、 $W_{CC}$  の値が大きくなるほど  $f_T$  の低下の割合が激しいことを示した。これは  $V_{CE}$  が小さい領域では実効ベース幅  $W$  が大きくなること、コレクタ高抵抗層中の電界が小さくなるためその中を走行する少数キャリアの走行速度が小さくなり、また  $W_{CC}$  の値も大きいのでコレクタ高抵抗層中の走行時間が大きくなることの二つが原因であることを実験的に明らかにした。

トランジスタの高注入動作状態における解析解は求まらないが、トランジスタの高注入動作状態におけるキャリアの挙動を正確に知ることは物理的に非常に興味深いのはいうまでもないが、実用的にも超高周波、高出力トランジスタ、スイッチング用トランジスタ、大電力用トランジスタ、forward AGC 用トランジスタの動作解析などという重要な問題が山積している。また高耐圧トランジスタの解析においては、更に熱い電子の問題なども考慮しなければならず解析解を得ることはますます困難になる。この様な問題を解決することを目的として電子計算機による数値計算のプログラミングを考えた。特に従来の計算方法はすべて拡散係数  $D$  と移動度  $\mu$  との間にアインシュタインの関係式  $D/\mu = kT/q$  を用いているが、最近半導体研究所において Si 及び Ge に対する拡散係数  $D$  の電界依存性の測定結果が発表され、それによると電界の大

きさがドリフト速度が飽和を示す臨界電界の値よりも小さいときには大略電界の大きさに比例して増加するような傾向を示すことが知られているから、ここでは $\mu$ 及び $D$ の電界依存性の測定結果を代入して、アインシュタインの関係式を用いなくて計算できるプログラミングを考え、計算を試みた。

最後に、電界効果トランジスタ(FET)の集中定数形等価回路の定数の測定を行い、その適用周波数限界を明らかにした。FETは入力抵抗が非常に高く、しかも多数キャリアによる伝導を用いているので低周波では入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが低いという特長を持っている。しかしいまのところは入出力容量が大きいので、シャ断周波数が低く高入力抵抗というせっかくの特長が生かされていない。また多数キャリアによるものだから注入形のものでなければ蓄積効果による時間遅れは考えなくても済むわけだが、いまのところは入力容量によるスイッチング時間がかかり大きくなっており、その特長が生かされない。また変換コンダクタンス $G_m$ も一般に小さい。図4に示すように

進行波形に組みこんで用いれば以上の問題の解決ができる。先の等価回路を用いて設計理

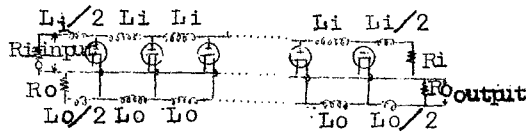


図4

を示し、実験結果とも良く一致することを示し、その上で各種の設計限界について示した。また集積回路用の分布形超高周波用電界効果トランジスタの構造を提案し、その構造のトランジスタの設計とその設計限界を与える要素を明らかにした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

接合形トランジスタでは双極性と云われる通常のトランジスタと電界効果トランジスタとが主要なものであるが、回路設計上重要な等価回路すら標準化が不十分で甚だ雑多な提案が行なわれている。本論文は漸く代表的と認められて来た T 形及び  $\pi$  形等価回路についてその精度を理論解析及び実例によって検討したものである。

本論文は 9 章よりなる。第 1 章はまえがき、第 2 章では従来発表されて来た諸種等価回路の分類と特徴を列記して、結局 T 形及び  $\pi$  形が最も優れていると考えられることを述べている。第 3 章は T 形及び  $\pi$  形等価回路の検討であって、特に基本となる電流増巾率について従来使用されて来た Thomas-Moll の近似式が予想に反して近似が悪く、位相おくれが 1 ラジアンになる周波数  $f_T$  において数十%の誤差になることを示し、指数関数表示を用いれば数%に留めることができ、遙かに近似がよくしかも簡単であることを示した。次いで T 形と  $\pi$  形を比較して T 形は指数関数表示を用いれば数%に留めることができるが、 $\pi$  形では約 10% に及ぶことを示した。以上より簡便さにおいては  $\pi$  形であるが、高い周波数で使うときには T 形を採用すべきことを結論している。

第 4 章は以上の解析結果の実験的検討である。低電流・低周波では充分よい一致を示すが、高注入状態や  $f_T$  をこえる様な周波数では不一致が無視できなくなることを結論付けその原因を分類している。

第 5 章はその一主要原因であるコレクタ空乏層中に大電流で形成される空間電荷効果を実験的に検討するためにコレクタ・ベース間に不純物量の少ない層を異った厚みに形成させて作ったトランジスタについて測定比較した結果をのべたものであり、第 6 章では、これらの結果を従来発表されたいろいろな理論によって検討を行なった結論を列挙しほゞ Kirk の理論によって説明できること、しかし Kirk の理論も理論的に不完全であることをのべている。

第 7 章では以上の結論に基づいて、高電流状態における解析には電子計算機による事が必要であることをのべ、如何なるプログラムによるべきかを論じている。

第 8 章は電界効果トランジスタの等価回路の選択と測定法及び高周波限界についての研究で、非常に簡単に適用範囲の広い等価回路を定め、測定法を提案してよい一致が得られることを示したものである。

以上要するに本論文は接合形トランジスタの標準等価回路と近似式との選択に決定的とも云える結論を示したもので、電子工学に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。