

氏名(本籍)	阿江 忠(兵庫県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第174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	回路を考慮したトランジスタのパルス 動作に関する基礎的研究
論文審査委員	(主査) 教授 真野 国夫 教授 佐藤利三郎 教授 西沢 潤一 教授 松尾 正之 助教授 高木 相

論文内容要旨

第1章 緒 論

半導体工学の進歩にともなって集積回路がますます高密度化の傾向にある現在、回路理論と半導体理論を総合した新しい領域における能動回路理論の確立は重要な問題である。その大きな分野であるパルス動作に関しては、もっとも重要な能動素子はいりまでもなくトランジスタであり、従来はトランジスタ自体の動作解明が一つの問題点とされていた。しかし、宮田、三浦、真野⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾らによる研究の結果、動作機構の解明までは解決がなされたので、本研究はひきつづき回路におけるトランジスタのパルス動作も明確にした。すなわち、本研究は、回路におけるトランジスタのパルス動作を正確に記述するモデルを導出し、これに基づき素子条件を含む回路設計の統一的手法の解立を目的とした基礎的研究である。

第2章 トランジスタのパルス応答ならびに回路に関する従来の研究

本章ではトランジスタ・スイッチおよび回路のパルス動作を解析し、また設計するという目的を遂行するために、現在までこれら諸点がどの程度まで研究されているかを統一的な思想のもとに概観し考察を加えた。

まず、モデル化のために必要なトランジスタのパルス応答解析法について検討し、回路応用を考慮したモデルとしてもっとも重要である宮田、三浦、真野による研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を考察した。次に、この非線形電荷制御法を回路応用までに進展させる場合の問題点を指摘し、電圧駆動解析は未解決の重要問題であることを明らかにした。さらに、パルス動作におけるトランジスタ回路の統一的设计に関する研究については従来いづれも不十分で、新しい考察が必要なることを指摘した。以上の結果から、本研究の立脚点を明示することができた。

第3章 駆動条件を考慮した大振幅過渡応答解析

前章で述べた非線形電荷制御解析法はモデル化のための基礎となる。本論文ではこの解析法を進展させ回路応用まで考慮したモデルの確立が、まず、必要であり、本章ではこの端緒として式表示可能な電圧駆動解析を行なった。

電圧駆動におけるスイッチ時間 t

$$t = \Gamma \cdot \frac{\tau_{B0}}{A} \ln \left\{ \frac{1}{1-b} + \frac{b}{1-b} \cdot \frac{A-1}{A+1} \right\} \quad (1)$$

$$\text{ただし} \quad A = \left(1 + \frac{4\tau_{B0}}{Q_0} \cdot \frac{V_0^{-N}}{R_0} \cdot \Gamma^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\Gamma = \left(\frac{K\tau_{B0}}{R_0} + 1 \right)^{-1} \quad (0 \leq \Gamma \leq 1) \quad (3)$$

ここに、 b : 駆動率、 $\tau_{B0} : Q_0 \rightarrow 0$ のときの τ_B 、 K および N : 動作条件による定数、

V_A および R_A : 駆動源電圧および抵抗、 Q_A : 定数

を求めた。式(1)は駆動回路の条件を考慮した一般的なスイッチ時間の表示式であり、定電流駆動における非線形解析⁽¹⁾および電圧駆動における線形解析⁽⁴⁾を包含する。 Γ は駆動指数⁽¹⁾の拡張形であり、 Γ は新たに電圧駆動係数として提案するものである。本節の解析結果より従来の電流駆動解析の限界を図1のように明示することができる。

さらに、二次元効果の影響は、西沢の理論⁽⁵⁾に基づいて大振幅時のベース電位降下 $V_{cb'}$ が、

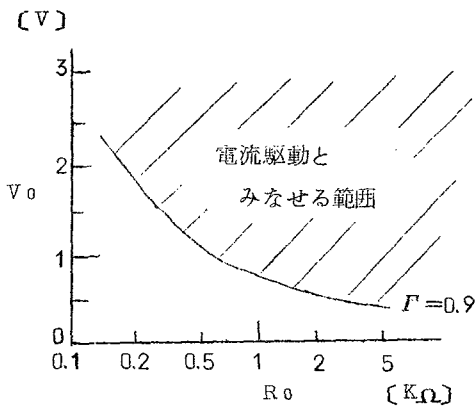


図1. 電流駆動とみなせる範囲

$$V_{bb'} = \frac{kT}{q} \ln \frac{1}{G} \quad (4)$$

$$\text{ただし, } G = 2\pi L a \cdot \frac{I_1(a/L)}{I_0(a/L)} \quad (5)$$

$$\text{ここで } L^2 = 2bL_p^2, \quad b = \mu_n / \mu_p,$$

a : エミッタ半径

と表現できることを導出した。そして、二次元効果を考慮した解析法をあわせ提示した。これらはいずれも実験的にもその妥当性を確かめた。

第4章 寄生効果を考慮した過渡応答解析モデルの検討

電圧駆動の領域まで拡張した場合、素子寄生効果を含む電荷制御解析法については理論的考察が必要である。本章では、第3章の手法を寄生効果を含む解析まで拡張するにあたり必要なこの考察を行なった。

この結果、素子寄生効果から生じる第2の時定数 τ_2 の影響は第1の時定数 τ_1 との比 ϕ で表現して、その最大値は

$$\phi_{\max} = \tau_0 / 4\tau_{bv} \quad (6)$$

ここで、 τ_0 : コレクタ時定数, τ_{bv} : 電圧駆動ベース時定数

となることが判明した。この式を実際に用いられる条件に適用すると、 $\phi_{\max} = 0.025$ 位が最大と考えられ、素子寄生効果を含む電荷制御法の妥当なことが証明できた。

また、回路寄生効果については、外部付加回路としての動作がトランジスタ寄生の効果と相乗して働く効果を明示することができた。

第5章 非線形性を考慮した過渡応答解析モデル

第3章、第4章の検討に基づいて、一般回路を想定した場合の大振幅過渡応答解析を行なった。その結果、ベース電荷 Q_B に関して Piecewise linear 近似した一分割区分のスイッチ時間表示式 t_{1i} および t_{2i} (添字1は負荷効果のないスイッチ時間をあらわし、添字2は負荷効果のために生じるスイッチ時間をあらわす)はそれぞれ第3章および文献(1)の拡張形すなわち式(7)および(8)で与えられ、総合のスイッチ時間 t は式(9)のようにそれらの和で求められた。

$$t = \sum_{i=1}^n t_{1i} \quad (7)$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^n t_2 i \quad (8)$$

$$t = t_1 + t_2 \quad (9)$$

さらに、本章では以上の一般的なモデルを回路に適用する場合の問題点についても考察し、回路条件が基本回路とは異なる場合の扱い方についても明らかにした。また、非線形性に着目した大振幅電荷制御モデルを将来問題となると想定される二次元効果の分布モデルに適用した場合についても重要な示唆が得られることを示した。

第6章 パルス動作におけるトランジスタの動作条件

パルス動作におけるトランジスタ回路の設計は経験的手法によるのが現状であり、製造手段における自動化のうす勢を考えあわせると統一的设计法を導出することは目下の急務であるといえる。

本章では、スイッチ回路の動作条件設定に関し最適計画問題として統一的に扱う手法を示した。すなわち、基本的には動作条件最適化問題は特性を総括した目的関数として、エネルギー

$$[E] = [\epsilon]^{-1} [T] [P] \quad (10)$$

ここに

$$[\epsilon] = \frac{[P]}{[P]_{\text{total}}} \quad (11)$$

ただし、 $[P]_{\text{total}}$: 総消費電力、 $[P]$: 情報伝達に有効な電力

$[T]$: スイッチ速度

を考える手法がもっとも普遍性をもつものと考えられる。すなわち、本研究では式(10)から種々の具体的手法が導出できることを示し、従来試みられた例⁽⁶⁾も包含されることを明らかにした。有用な例は表1のように示されるが、情報伝達エネルギーに着目した場合および消費電力に着目した場合それぞれについて最適条件を明示した。

また、以上は基本回路の設計だけでなく、一般回路網へも拡張ができる。このため、行列を用いた一般表現を行なったが、その基本は式(10)を行列の二次形式で表現すればよく、以下の導出は同じようになる。

$[\epsilon]$	パラメータ	目的関数	註
≈ 1	$[T]$	$[P]$	情報伝達に着目
	$[P]$	$[T]$	除外(併用可)
≠ 1	$[P]$	$[\epsilon]^{-1} [T]$	消費電力に着目

表1. 設計手法の分類

すなわち、本章では従来明確でなかった統一的设计手法を示すことができた。

第7章 パルス動作におけるトランジスタ回路の構成法

前章では狭義の意味での設計，すなわち，すでに求められている回路の動作条件を最適化する手法について述べたが，最良の回路を追求するためには根本的に構成そのものを考える必要がある。本章では，このため回路構成そのものを対象とした広義の意味での設計問題を明らかにし，新しい方式および理論の提案を行なった。

論理関数の制約が大なる回路の構成法については素子条件に立脚した考察を行ない，一方，制約が小なる回路については新しく構成理論を導出した。後者はパルス発振生起に関する山田，高木，真野⁽⁷⁾の研究を準用することにより，スイッチ回路設計の条件を求めることができる。

さらに，一般回路問題への拡張法も示した。

第8章 トランジスタのパルス動作改善法

解析および設計に関する前章までの研究結果から回路を含めたトランジスタのパルス動作を明確にし，その改善法を求めた。

まず，活性領域の動作改善法は基本的には第3章，第4章，第5章で検討した電圧駆動がその基礎となるわけで改善の実現例についても考察した。次に，飽和特性は性能を劣化させるだけのもので何ら能動性に寄与しない領域であることから，この低減法について述べた。この解決についてはこれまでの積み重ね⁽⁸⁾を考慮して新しく有用な方法を提案した。この具体例としては相補型構成が挙げられ，その妥当性は実験的にも確かめられた。

本章で述べたそれぞれの手法は当然併用されるべきものであり，また併用が可能である。

第9章 総合的検討

本章では，本研究の遂行過程において派生的に生じた諸問題について検討を加えた。活性領域の動作改善に有用である電圧駆動回路は第8章で示したように性能指数を高める実現が可能であるが，このとき安定度が問題となる。しかし，Sensitivity を検討した結果，十分な設計を行えば解決できることを示した。また，パルス動作改善法については現在の技術で実現できる方法を検討した結果，わずかの素子改良により回路手法の改善をさらに大きくできることが判明した。この例として，4極構造化する手法を示し，図2のような入力駆動波形の等価実現となることを示した。図2の改善値と実現例との比較を表2に示したが，わずかの改良で大きくスイッチ時間を改善することができた。



図2 好ましい駆動波形

特 性	改善前	図 2 の改善値	実 現 例
ターンオフ時間	1	1	1.14
蓄積時間	1	0.4	0.50
ターンオフ時間	1	0.2	0.38

表 2. 実現例と図 2 による改善理論との比較

第 10 章 総合的結論

本研究の結果、回路におけるトランジスタの過渡応答特性の動作条件に対する種々の変化を厳密に解析できるようになったばかりでなく、素子条件を考慮した設計理論の展開が可能となった。この設計理論は将来の製造技術にも適用できるよう一般論として述べることを目指したものであるが、同時に現在の技術への適用法も明らかにした。

すなわち、本研究は回路を考慮したトランジスタのパルス動作を基礎的に解明することにより、素子条件を考慮した能動回路理論の確立に貢献したものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり終始御懇切なる御指導と御助言を賜った真野国夫教授、研究途上種々御指導御助言を賜った西沢潤一教授、佐藤利三郎教授、松尾正之教授、斎藤伸自教授、高木相助教授ならびに御討論下さった方々に深く感謝する次第である。

文 献

- (1) 宮田, 三浦, 真野: 信学誌, 49, 1, p.60 (昭41-01)
- (2) 宮田, 三浦, 真野: 信学誌, 50, 1, p.115 (昭42-01)
- (3) 宮田, 三浦, 真野: 信学論(C), 51-C, 4, p.130 (昭43-04)
- (4) C.Lecan他: Philips Tech.Lib.(1962)
- (5) 西沢: 信学誌, 44, 5, p.767 (昭36-05)
- (6) 金井: 信学誌, 50, 8, p.1389 (昭42-08)
- (7) 山田, 高木, 真野: 電気関係学会東北支部連大, 6C-13 (昭42-10)
- (8) 宮田, 三浦, 西沢, 真野: 信学会半導体トランジスタ研資, TR66.2-27 (昭42-02)

審査結果の要旨

半導体工学の進歩に伴って、集積回路はますます高密度化の傾向にある。その大きな分野であるパルス動作に関しては、回路理論と半導体動作理論とを総合した新しい分野の形成が極めて重要なことでありながら、その工学的体系は確立されていないといっても過言ではない。

著者は、トランジスタのパルス動作を正確に記述する理論を展開し、能動素子と回路を最適化すべき総合的動作理論体系の基礎を確立し、回路設計の統一的手法を提唱した。

本論文は、これらの結果をまとめたもので、10章よりなっている。

第1章は緒論で、第2章では関連ある従来の研究を検討し、本論文の意義と立脚点を明確にしている。

第3章では、真野、宮田らによって提唱された非線形電荷制御モデルに駆動条件を加えた場合につき考察している。

第4章では、寄生効果を含む電荷制御モデルにつき理論的基礎を明確にしている。

第5章では、以上の結果から、回路解析に適用できる非線形電荷制御モデルを提案している。これはトランジスタのパルス動作把握に十分な大振幅過渡応答解析モデルとして、新しい知見である。

第6章では、著者の提案したモデルを利用し、回路構成が与えられた場合のトランジスタ動作条件設定法を提案している。

第7章では、能動素子条件を考慮した回路の導出につき理論考察を行なった結果を述べている。

第8章では、以上の結果を総合し、能動素子とその周辺回路との両条件を考慮したパルス動作の最適性能を得る手法を提案し、例として、具体的新回路の導出を示している。これらは新しい提案である。

第9章では、本問題に総合的な検討を加えており、以上の理論的体系をより明確にしている。

第10章は結論である。

以上、これを要するに、著者は能動素子のパルス動作をより正確に記述する理論を展開し、能動素子条件と回路条件とを総合的に考慮したパルス動作理論の工学的体系の基礎を確立し、それを基として、最適設計に関する手法を提案すると共に、新回路を提示するなど、斯界の新しい分野への進展の基礎を確立し、回路工学、工業上その発展に寄与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。