

学 位 論 文 題 名

進行波型素子を基調とする超高速論理回路構成法の研究

学位論文内容の要旨

電子回路の高速化は将来のテラビット級高速光通信システム構築に直接的に結びつく極めて重要な技術領域である。現況ではWDMシステムにあってもTDMシステムにあっても処理系についてみると、伝送データとシステムクロックとの同期処理の困難が光通信系の一層の高速化の妨げとなっている。同期処理をも可能とする光メモリ／光フリップフロップの研究開発は各所で進められている一方電子技術の限界打破を狙う高速同期処理技術に関する検討はほとんど例のない状況である。

そこで後者の立場にあって従来構成を棄却し同期処理をはじめとして光通信系の一層の高速化実現に資する新規電子回路構成を構築することに可能性を求めたい。ここで従来構成とはトランジスタを基調とする集中定数型電子回路を指す。

構成要素の物理長が信号波長に近接してくると集中定数的な等価回路は特性を正しく反映しえなくなる。もとよりトランジスタ性能の劇的向上の望めない上に分布定数効果を有為に取り込むことの不可能な回路構成では論理回路の100 Gbit/s以上の高速化はかなりの困難を伴う。分布定数効果をむしろ積極的に論理回路に適用することを指導原理としてその高速化を議論することはまずなされなければならない重要課題といえる。

本研究は進行波型素子を基調とする論理回路構成法を構築することによってこうした指導原理に基づいて処理速度の高速化を検討するものである。

この際、既存回路構成の進行波素子による素直な置換では成功しない。殊に順序回路は一般にフィードバックを含み信号遅延を増長する進行波素子によっては帰還遅延が大となり特性は劣化してしまう。光通信系にあっては順序回路の主たる機能はまさにリタイミング処理である。これをフィードフォワード構成でなしうる進行波素子を与えることが回路レベルの議論として不可欠といえる。

本論文ではこれをはじめとする進行波型論理回路の回路レベルでの要素化と所望の信号処理を具現化するための汎用化とを与えることが一つの目的である。またかかる論理回路を素子レベルで実現するための進行波型素子がそれぞれの要素回路に対して求められる。それぞれの設計論は新たに構築するところであり、これを議論することがまた目的となる。そして考案した設計論の実験的裏付けのために行った回路・素子試作の評価結果を併せ議論する。以上によって進行波型論理回路による超高速論理処理の実現に向けた基礎的検討項目を包括的に議論することが骨子となっている。

こうした研究に関する報告を行う本論文は以下の六章からなる。

第一章は序論である。電子回路の高速化がなにゆえ重要な研究項目たるのかをシーズ／ニーズの両面の技術的進展および現況、課題とを概観することで明らかにする。続いて本論文で主張する新規論

理回路構成が何を指導原理として成り立ち、そしてどういう位置付けにあるのかを明らかにする。

第二章において集中定数型電子回路構成の高速化の取り組みを議論する。議論はフリップフロップに注目する。標準的構成として知られるマスタースレーブ型フリップフロップの動作原理ならびに高速化の困難な理由を明確にする。つづいてその高速化手法の一般論を示し、次に本研究で考案、試作、評価を行った回路を明示する。これを題材として集中定数型設計法による高速化の程度を明らかにする。本章の目的は第三章以降展開する進行波型論理回路のある意味で対立する回路構成法について議論し、進行波型構成の客観的位置付けを行うことである。

第三章において進行波型論理回路を提案する。はじめにその動機付け／基本コンセプトを第一章、第二章の議論を踏まえて明らかにする。すなわち扱う信号の周波数の向上とともに素子のサイズ効果の顕在化する事実をもって進行波型構成をとることのメリットを主張し、論理回路に導入する際に考慮すべき案件すなわち帰還回路の排除がいかなる形で求められるかを議論する。続いて進行波型論理回路を光通信系に適用する際に求められる機能を議論する。ここではその機能実現のための最も単純な構成を提案する。それは必要となる機能の要素化に基づき、もって回路構成にあっても三種の要素回路化が果たされる。

第四章においてこの三種の要素回路それぞれについての設計論を展開する。論文に詳述するように三種とはリタイミング回路、ゲーティング回路、整形回路のそれぞれである。リタイミング回路は光入力によって素子中を伝播する電気信号の位相変調がなされる光制御移相器を必要とする。はじめに同回路の構成と動作原理を明らかにし、後に新規に考案した光制御移相器の特性を従来知られる素子特性との差異を明確にしつつ議論する。他二種についてもはじめに回路構成／動作原理を明らかにしその設計指針を続けて議論する。整形回路については進行波型トランジスタを核とする。進行波型トランジスタはこれまで広帯域の電力増幅器としての利用に終始し論理回路への適用は報告例がない。増幅器用途に関わる進行波型トランジスタの研究の推移を概観するとともに論理回路に適用する際の設計論を展開する。その動作条件によって線形伝播、非線形伝播の二つの場合があり得る。両者について併記する。

第五章において要素回路それぞれについて行った実験的特性検証結果を示す。回路の応答はいずれも商用ベースの計測器の帯域を超えるものであり実験にあたっては電気光学サンプリングを用いた。その概要を含め実際に用いた実験系をまず明らかにする。そして各要素回路について試作素子構造、回路レイアウトを明示しつつ実験結果へと議論を展開する。試作品種はいずれも基本動作確認を目途としており回路の実用性を議論する段階にはないが、総じて理論的検討結果と整合的な特性を得るに至っている。

第六章において第四章、第五章で展開する設計論／理論解析／実験結果を包括的に議論しまた今後の展望を議論する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 眞 史

副 査 教 授 雨 宮 好 仁

副 査 教 授 宮 永 喜 一

副 査 教 授 佐 野 栄 一

学 位 論 文 題 名

進行波型素子を基調とする超高速論理回路構成法の研究

電子回路の高速化は将来のテラビット級高速光通信システム構築に直接的に結びつく極めて重要な技術領域である。現況ではWDMシステムにおいてもTDMシステムにおいても処理系についてみると、伝送データとシステムクロックとの同期処理の困難が光通信系の一層の高速化の妨げとなっている。同期処理をも可能とする光メモリ／光フリップフロップの研究開発は各所で進められているが、電子技術の限界打破を狙う高速同期処理技術に関する検討は世界的に見てもあまり例のない状況である。

そこで、従来のトランジスタを基調とする集中定数型電子回路構成を棄却し、同期処理をはじめとして光通信系の一層の高速化実現に資する新規電子回路構成を構築することに可能性を求める必要がある。構成要素の物理長が信号波長に近接してくると、集中定数的な等価回路は特性を正しく反映しえなくなる。もとよりトランジスタ性能の画期的向上の望めない上に分布定数効果を有為に取り込むことの不可能な回路構成では論理回路の100 Gbit/s以上の高速化はかなりの困難を伴う。分布定数効果をむしろ積極的に論理回路に適用することを指導原理としてその高速化を議論することは急務な重要課題といえる。

本研究は進行波型素子を基調とする論理回路構成法を構築することによって、こうした指導原理に基づいて処理速度の高速化を検討するものである。この際、既存回路構成の進行波素子による素直な置換では成功しない。殊に順序回路は一般にフィードバックを含み、信号遅延を増長する進行波素子によっては帰還遅延が大となり、特性は劣化してしまう。光通信系にあっては、順序回路の主たる機能はまさにリタイミング処理である。これをフィードフォワード構成でなしうる進行波素子を与えることが回路レベルの議論として不可欠といえる。

本論文は、進行波型論理回路の回路レベルでの要素化と所望の信号処理を具現化するための汎用化とを与えることが第一の目的である。また、かかる論理回路を素子レベルで実現するための進行波型素子が、それぞれの要素回路に対して求められる。進行波型素子と要素回路の設計論を新たに構築し、これを議論することが第二の目的である。さらに、考案した設計論の実験的裏付けのために行った回路・素子試作の評価結果を併せ議論することが第三の目的である。

かかる目的で実施した本論文は以下の6章から構成されている。

第一章は序論である。はじめに電子回路高速化の重要性をシーズ／ニーズの両面の技術的進展および現況、課題とを概観することで明らかにしている。続いて本論文で主張する新規論理回路構成の指導原理と、その位置付

けを明らかにしている。

第二章において、集中定数型電子回路構成の高速化の取り組みを議論している。議論はトランジスタに立脚する構成と量子効果素子による構成とにわけて行っている。前者の議論では筆者が考案／試作／評価を行ったフリップフロップの概要を明示し、その高速化の限界を明らかにすることを中心にこれまでの報告例をあげその問題点を明確にしている。一方後者の議論では量子効果素子として唯一実用化に向けた検討の進んでいる共鳴トンネルダイオードに立脚した議論を総括し、その可能性と問題点を明確にしている。すなわち、本章は第三章以降展開する進行波型論理回路にある意味で対立する回路構成法について議論し、進行波型構成の客観的位置付けを明確化している。

第三章において、進行波型論理回路を提案している。はじめにその動機付け／基本コンセプトを第一章、第二章の議論を踏まえて明らかにしている。すなわち扱う信号の周波数の向上とともに、素子のサイズ効果の顕在化する事実をもって進行波型構成をとることのメリットを主張し、論理回路に導入する際に考慮すべき案件、すなわち、帰還回路の排除がいかなる形で求められるかを議論している。続いて進行波型論理回路を光通信系に適用する際に求められる機能を議論している。ここではその機能実現のために必要となる機能の要素化に基づき、リタイミング回路、ゲーティング回路、整形回路の三種の要素回路からなる最も単純な構成を提案している。

第四章において、この三種の要素回路それぞれについての設計論を展開している。リタイミング回路は光入力によって素子中を伝播する電気信号の位相変調がなされる光制御移相器により実現することを提案している。はじめに同回路の構成と動作原理を明らかにし、続いて新規に考案した光制御移相器の特性を従来知られる素子特性との差異を明確にしつつ議論している。他二種についてもはじめに回路構成／動作原理を明らかにし、その設計指針を続けて議論している。整形回路については進行波型トランジスタを適用することを提案し、線形伝播、非線形伝播の二つの場合について設計論を展開している。

第五章において、要素回路それぞれについて行った実験的特性検証結果を示している。回路の応答はいずれも商用ベースの計測器の帯域を超えるものであり、実験にあたっては電気光学サンプリングを用い、その概要を含め実際に用いた実験系をまず明らかにしている。そして各要素回路について試作素子構造、回路レイアウトを明示しつつ実験結果へと議論を展開している。試作品種はいずれも基本動作確認を目途としており回路の実用性を議論する段階にはないが、総じて理論的検討結果と整合的な特性を得るに至っている。

第六章において、第四章、第五章で展開する設計論／理論解析／実験結果を包括的に議論し、また、今後の展望を議論している。

これを要するに、著者は、従来の集中定数型論理回路の高速化限界を打破するために、進行波型論理回路の概念を提案し、その要素回路とそれらを実現するために必要な進行波型素子に関する設計論を構築するとともに、実験により設計法を検証し、高速回路に関する有益な知見を得ており、集積回路工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。