

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名

審査委員主査	上野 芳康	印
委員	山口 浩一	印
委員	植田 憲一	印
委員	奥野 剛史	印
委員	來住 直人	印
委員	神谷 武志	印

本邦の光通信技術開発と学術研究の双方が多く回り道を強いられた1990年代後半の世界的テレコムバブル以来、10年近くを経た。産官学における光通信関連研究開発力が復活しつつある。コンシューマ市場に関しては、黎明期のFTTH技術を圧倒的に抑えたDSL技術が2008年現在下火となりつつあり、各国共に遅かれ早かれDSLからFTTH時代へ移行することが誰の眼にも明らかになった。我が国のFTTH移行速度は、過去5年以上に亘って先進諸国を先駆けており、1,2年前にはDSL契約者総数を追い越した。我が国で現在進行中のFTTH技術開発と市場展開過程は、中国を含む先進諸国の技術者・事業者の注目を集めている。

一方の情報通信装置産業に関しては、日欧米のCO₂削減総論合意など地球規模の社会的背景、および、情報通信量とインフラの継続的増大を受けて、商用サーバーや情報通信装置の省エネルギー技術開発が、各国の最優先課題の1つに浮上しつつある（日本のNEDOやJST Pj、オランダ、EU Pj、米国DARPA Pjなど）。これと並行して、商用装置技術開発の焦点は、1990年代後半の「長距離の大容量WDM伝送技術」から近年の「中短距離で、より優れた”全光交換”技術」に、移行した。これまで独立に発展してきたSDH多重信号規格(ITU-T)とLAN多重信号規格(IEEE)が、近い将来10G-100G周波数領域で一本化されることがほぼ確実視され、100G通信方式でコヒーレント光位相変調伝送方式が初めて採用されると見込まれている。ただしコヒーレント光伝送方式は、光交換・光信号処理上の将来発展性に乏しいのではないかと懸念される。

学位申請者の研究分野は、現在のWDM・コヒーレント伝送技術の次に来るべき、本格的な全光交換・光信号処理システム技術開発を意図する『先端デバイス研究』と位置付けられる。超高速な全光ゲートの構造研究、駆動方式研究、材料物性研究が、中心である。（1995年前後の歴史的背景に基づいて、国際学会では、光時分割多重（OTDM）方式のデバイス研究と呼称されることが多い。）

1990年代前半に始まった”全光ゲート研究”は、NEC研（日本）、BT研（英国）、H. ヘルツ研（ドイツ）、Bell研（米国）、富士通研（日本）、アイントホーフェン工大（オランダ）などが世界をリードしてきた。中でもア工大の信号速度は”毎秒300ギガビット”を越えつつある。ただし研究成果競争の下で、この技術分野の

今後の基盤をなすべき学術的研究成果の蓄積と体系化が遅れている、と言わざるを得ない。これらの背景を踏まえ、申請者は、主として次の3つの研究課題に取り組んだ。

- (1) 半導体光導波路素子の単体高速量子変換効率を相互比較評価し、これらに基づく全光ゲート消費電力モデル（世界初）を構築する。さらにできれば、半導体素子の材料・内部構造との因果関係を探索する。半導体素子は、国内外有力機関へ、研究試作依頼する。
- (2) 高速光出力パルス波形を高感度・低雑音に計測する装置と技術を立ち上げ、従来報告の全光ゲート動作モデルを、より緻密に検証する。
- (3) 毎秒200ギガビットの長ワードデータ信号発生装置とその計測装置を製作し、既報の全光ゲート駆動方式2種を体系的に評価、かつ、新たな方式を探索する。

である。

学位論文の第1章では、上述の背景のうち、光時分割多重通信(OTDM)方式の基本構成、従来のOTDMデバイス研究で提案されてきた一連の全光ゲート機能、NEC（毎秒160ギガビット）～アイントホーフエン工大（毎秒320ギガビット、2006年）の全光ゲート駆動方式（信号波長変換機能を有する）の基本構成と特徴などを、大学院初級学生にもわかりやすいように紹介しようと努めている。

第2章では、産学連携共同研究等を介して国内国外計3機関に研究試作依頼した半導体光導波路素子（進行波型半導体光増幅器チップ、計7種類）の立体構造、微分利得や飽和エネルギーなどの基礎特性パラメータ測定値一式、電子-光子変換効率の系統的評価結果、消費電力モデル作成とその実験検証、および、半導体素子材料構造との因果関係検討の結果を報告している。消費電力モデル作成の第1段階では、常時静的に注入される電子密度から超高速に消費される光子密度への量子変換過程を3段階に分離する、新しい量子変換効率モデルが提唱された。従来の光エレクトロニクスでは2段階にモデル化されてきたため、本研究では新たな1段階が積み増されている。材料構造と量子効率の因果関係検討結果に関しては、半導体素子試作上の強い制約により、限定的な結論に留まった。本章ではむしろ、各国の最新設備で試作された半導体素子を踏まえて毎秒100ギガビット周波数領域まで実験検証された「世界初の消費電力モデル」の提案が、より大きな成果と認められる。なお、本研究の実効的周波数上限値（毎秒100ギガビット）は実験環境上の限界値であって、半導体素子物性上の限界ではないと見込まれる。

本モデル提案の結果、例えば、毎秒10ギガビット～100ギガビットの駆動速度に相当する、比較的広範な実効的応答時定数範囲(10～100ピコ秒)において、ゲート消費電力が単純な2乗則（dc消費電力 $\propto$ ビットレート $\cdot B^2$ ）に相対的に従うことが判明した。光加速作用と材料固有時定数の相補性など、いくつかの重要な手がかりも提示されている。消費電力モデル提案を中心とするこれらの先駆的結果は、高速・高効率な新材料研究者～デバイス構造研究者の今後の“研究指針”策定や将来ビジョン形成に貢献しうる、大きな成果と認められる。

第3章では、半導体光導波路素子、1種を利用して全光ゲート試作機を製作し、かつ、高感度・低雑音計測システムを製作し、従来報告されている全光ゲート動作モデルの適用可能範囲拡大を、試みた。具体的には、高速出力光波形の微弱な詳細構造まで適用可能か否かを、実験的に緻密に検証した。実験的測定結果とモ

デル計算結果を系統的に照合した結果、微弱な高速詳細波形成分にまで予想以上に適用可能なことが、世界で初めて示された。この種の研究報告も従来殆ど存在せず、工学的に価値の高い独自成果と認められる。

なお第2章と第3章の段階までは、申請者は、入力信号パルスの繰り返し周波数を意図的に分周している（市販装置出力の12.5ギガヘルツから1ギガヘルツ前後へ）。周波数を分周した理由は、量子効率や消費エネルギーなど基礎的材料物性評価上好都合なためである。一方の信号パルス幅に関しては、これも材料物性評価上の必要条件に応じて、毎秒160ギガビット通信相当の信号パルス幅に設定している（2ピコ秒前後）。

第4章で、申請者は、毎秒200ギガビットの本格的な擬似データ信号発生システム、および、低ジッターな超高速・長ワードデータ波形計測システムを試作し、これらを利用して、全光ゲート駆動特性評価研究を実施した。製作した長ワードデータ発生・計測実験システムは、従来のOTDMデバイス研究に存在しなかったと思われる（従来の160～320ギガビット実験報告中のデータ長は $2^7=127$ ビット）。計測システム製作の過程で、独自の同期パルス抽出方式を考案し、超高速データ波形計測システム全般に共通する難題（データ信号－参照信号相互のタイミングジッター）を上手に克服している。以上の準備を経て、以下の3系統の課題が研究され、それぞれの成果が報告された。

(a) 従来の光加速駆動方式に従って、全光ゲート内部の半導体素子の実効的応答時定数を10ピコ秒まで光注入加速しつつ、毎秒200ギガビット、5,000ビット長の擬似データで全光ゲート駆動実験した。上述のゲート動作モデルから見て妥当な、やや大きなデータパターン依存強度雑音(PIF)の発生が確認された。

(b) デンマーク工大単独、電通大－デ工大共同研究、アイントホーフェン工大の順に報告されている高周波光バンドパスフィルタに基づく実効的な加速作用の寄与度を、5,000ビット擬似データ中のPIF最大箇所に着目して検証した。その結果、確かに、PIFの顕著な低減が認められた。

(c) 非線形光導波路や進行波型半導体増幅器で以前より知られている”非線形偏光回転作用”が、本研究の全光ゲート構成において、実効的な加速作用に寄与し得るか否かを実験的に探索した。その結果、全光ゲートの内部や前後に挿入した偏光制御素子方位の特定条件下で、顕著な加速作用が、世界で初めて検出された。本作用を加えて本実験研究で実現したPIF最小値は1.5@200Gb/sであった。以上により、新しい応答速度加速作用を発見すると共に、200ギガビット光ゲートのPIF問題克服の見通しを示した。

2章～4章相当の研究を実施する過程で、申請者は、同研究室で実施された国際共同研究（本学－デンマーク工科大学）などいくつかの共同研究に貢献している（論文末尾の共著学術論文リスト参照）。研究室内の博士前期課程研究・卒業研究にも積極的に参画した。それらの結果として、卒業研究生が製作した低分散・高精度光時間多重器(1:4, 200Gb/s)や低分散・高出力光ファイバー増幅器などが、本研究の大規模高速実験に実際に役立っている。

最後の第5章では、2～4章で報告した研究成果を要約・結論付けた上で、本研究の実施過程で新たに認識されたいくつかの重要研究課題と、申請者本人が描いている将来ビジョンが記述されている。

なお、本件の審査委員会は、COE研究学生の学位取得要件に従って、当該分野で国際的評価が確立している国際評価者3名（アイントホーフェン工大教授、デ

ンマーク工大教授、カールスルーエ大学教授)に論文評価レポート作成を依頼した。評価者3名のそれぞれも、本論文の独自成果の工学的価値を、高く評価した。

以上の一連の内容により、本論文は、博士(工学)請求論文として十分な価値を有するものと認める。