

研究課題別 事後評価結果

1. 研究課題名： 非相反デジタル光集積回路の開発と全光ネットワークへの応用

2. 研究代表者： 中野 義昭（東京大学 先端科学技術研究センター 教授）

3. 研究内容及び成果

本研究は、これまでの研究で基礎を築いた「デジタルフォトニクス」をさらに発展させ、実用的デバイスとして社会に提供することを目標とした。特に、デジタルフォトニクスにおける光非相反性の重要性(これによって初めて光信号の一方向性が保証され、順序論理回路が可能となる)を前面に据え、各光デジタルデバイスの縦続接続による全光信号処理集積機能回路の開発にフォーカスして、研究を発展・継続してきた。

本研究で目指す非相反デジタル光集積回路が実現されれば、光信号の汎用的デジタル信号処理へ向けた道が拓ける。すなわち、光パケットスイッチングで必要とされる光アドレス認識、光アドレス生成・付与、光パケットバッファリング等のさらに進んだ全光処理・全光スイッチングへ展開することが可能になる。

上記の基本構想の下で、2004年11月～2007年3月の約2年半の期間研究開発を行い、次に述べる1)～6)の成果をチーム全体で達成出来た。

1)単原子層急峻 MOVPE 成長技術に基づく高効率・高速光非線型性の獲得

これまでの研究で可能となった「有機金属気相エピタキシャル成長(MOVPE)による単原子層の急峻なヘテロ界面構造(多重量子井戸、超格子)の成長」を活用して、従来にない高効率、高速な光非線型性獲得の実現に向け、次の2項目に注力した。

① GaN/AlN サブバンド間遷移に基づく超高速光非線型性の獲得

高度界面制御技術により達成された $2.3\mu\text{m}$ 帯のサブバンド間遷移吸収を、通信波長帯の $1.55\mu\text{m}$ まで短波長化し、それを利用して相互吸収変調型の超高速全光スイッチの試作を目指した。その結果、パルスインジェクション法という全く新たな MOVPE 成長モードを用いることにより、高品質 AlN が 800°C という低温で成長出来るようになった。同成長モードによる GaN の成長も可能となったが、高濃度ドーピングに課題が残ったため、MOVPE による $1.55\mu\text{m}$ サブバンド間遷移を実現するには至らなかった。次善の策として、 $1.55\mu\text{m}$ 帯のサブバンド間遷移多重量子井戸を分子線エピタキシー(MBE)により成長させ、AlN クラッド層を MOVPE で成長させるハイブリッド法を開発した。さらに AlN クラッド層をドライエッチングする新たな技術を開発することで、 $1.55\mu\text{m}$ 帯全光スイッチを実際に試作し、従来報告された中で最小の制御光エネルギーで全光スイッチングを行うことに成功した。

② InGaAs/InAlAs/InP 電界吸収高効率光非線型性の獲得

伝導帯オフセットが大きいため、InGaAsP 系に比べて優れた標記材料系の量子井戸を

MOVPE によって界面品質で形成することが可能になった。その成果を活用し、実際に、電界吸収光非線形性を利用した偏光干渉計型全光デジタル波長変換器、およびマツハツエンダー干渉計型(MZI)の全光ロジックゲートを作製して、所期の成果を得た。さらに、キャリア空乏効果により極めて高効率な電気光学位相変調が可能であることを新たに見出した

2) 磁性半導体または強磁性金属による磁気光学効果の半導体光回路への導入

提案・試作した強磁性金属装荷型 TE モード非相反光導波路構造について、その構造を最適化し、より高いアイソレーション比を実現した。さらに、強磁性金属装荷型の TM モード非相反光導波路を試作し、実際に TM モードに対する光非相反性が発揮されることを実証した。一方、これまでに開発したエピタキシャル磁性半導体を非相反光デバイスに適用する試みを新たに開始し、MOVPE/MBE ハイブリッド成長によりエピタキシャル MnAs を磁気光学層とする TM モード導波路型光アイソレータの試作に初めて成功した。さらに、その磁化特性を制御し外部磁場印加を必要としない非相反光導波路を開発し、また MnAs の加工を新たに可能とすることで屈折率導波型の非相反光導波路を開発した。

3) MOVPE 選択成長に基づく光集積回路設計支援ソフトウェアの開発

MOVPE 選択成長について、任意のマスク形状に対応する材料組成や成長膜厚を予測し、また逆に、必要なバンドギャップエネルギーからマスク形状を算出する計算機支援設計(CAD)ソフトウェアを開発した。同ソフトウェアを応用して、能動素子と受動素子の接続部における遷移領域長を短縮化するマスク形状の設計を行い、また CWDM 用 DFB レーザアレイの 20nm 間隔利得ピーク波長実現のためのマスク設計を行った。さらに、本事業における全光ロジックゲート作製のための 4 バンドギャップ集積マスク設計が本ソフトウェアにより可能となった。

4) 要素デジタル光デバイスの確立

①全光フリップフロップの完成

3 種類の全光フリップフロップのうち、性能のバランスが最も良い多モード干渉結合器型(MMI)について最適設計を行い、光集積回路の中での要素デバイスとして確立した。さらに、集積化し縦続接続した際に劈開端面を用いずに動作するよう、共振器を分布ブラッグ反射器(DBR)により構成することを研究し、オフセット量子井戸集積技術などを開発して MMI DBR 型の全光フリップフロップ試作に成功した。試作素子において実際に、大きい消光比と高い副モード抑圧比が得られた。

② 全光ロジックの完成

MOVPE 選択成長技術により、非線型 SOA、プリアンプ SOA、位相変調器、受動導波路部のそれぞれに異なるバンドギャップを適用した SOA MZI 全光ロジックゲートの開発に成功し、

試作素子において全光処理の超高速性が実証された。

5) 非相反デジタル光デバイスのモノリシック集積回路化

要素光デバイスの光集積回路化を行った。具体的には、TEモード光アイソレータと分布帰還型(DFB)レーザのモノリシック集積素子、および SOA-MZI 全光ロジックゲートと MMI-DBR 全光フリップフロップから構成される全光ラベル処理光パケットルーティング回路である。前者において、非相反光素子の導入が実際に半導体光集積回路上で可能であることが示され、また後者において全光デジタル処理が近未来の超大容量・低消費電力光パケットルーティングに極めて有効であることを実証した。

6) フォトニックネットワークへの応用

5) で試作された全光ラベル処理光パケットルーティング回路を経済産業省フォトニックネットワークプロジェクトで保有する伝送特性測定テストベッドに持ち込み評価した。その結果、320Gbps(40Gbps×8 波長)の超大容量光パケットをエラーフリーでスイッチングすることが可能であることが実証され、本プロジェクトで開発した光集積回路がフォトニックネットワークに対し高い適用性を保有することが示された。本プロジェクトを端緒にして、波長多重光パケットのユニバーサルスイッチング技術を検討する総務省プロジェクトが開始された。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

大部分の項目で目標を定性的には達成またはそれに近い状況である。特に非相反デジタル光集積回路として、半導体光導波路型アイソレータとDFB半導体レーザの集積化が実現されていること、DBR-MMIフリップフロップによる光バッファ実験、光MZIスイッチ、光集積デバイス試作・評価等高く評価できる。単一大学内で、半導体結晶材料・磁性体材料から半導体光集積デバイス、光通信応用などを専門とする関連分野の多くのグループからなる体制が組織化され、有機的な連携のもとに研究が遂行され、国内外の類似研究と比較してもトップクラスの広範な成果が得られていると言える。しかしその反面、研究課題の新規性・独創性の高い部分への焦点の絞込みが必ずしも十分とは言えなかった面があることも否めない。極めて活発な論文発表・口頭発表がなされ、成果公開の努力がなされた。多くの学会賞等の獲得、若手研究者育成への貢献も特筆に価する。今後のさらなる展開が大いに期待される。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

全光信号処理集積機能回路の開発に大きく寄与し、将来の光情報通信網時代の到来に向けて「デジタルフォトニクスデバイス」という概念を世界に先駆けて発信した。さらに、選択MOVPE結晶成長からデバイスプロセス、デバイス技術まで広範な成果を出しおり、科学技術への貢献は

大きい。但し、個々の要素技術についてはまだ実用レベルに達していないという問題を残している。独創性の高い磁性体薄膜による非相反損失素子の実現可能性の実証と、半導体レーザとの集積化実証は大きな技術的意義がある。しかし、懸念された挿入損失問題が十分に解決されておらず、実用的数値性能が達成された訳ではない。他の項目においても、高集積光フリップフロップ等、優れた成果であるが、数値性能を含めてみた場合、これらもまだ実用レベルにあるとは言えない。半導体レーザと光アイソレータ集積化ではアイソレーションとして30dB以上を期待し、また、全光論理ゲート、全光フリップフロップでは早期に使える素子開発を期待する。フォトニックネットワークで、デジタル光デバイスが効果を発揮するには伝播時間で全光処理の速度が決まるため、かなりの素子がコンパクトに集積される必要がある。また、デジタルエレクトロニクスのアナロジーで議論を展開しており、光デジタルになった場合、本当に高効率、低消費電力、高速度など効果が出るかどうかの基礎的な検討がまだ必要である。しかし、光ネットワークのためのデジタル光集積デバイスの必要性は非相反素子の必要性も含めて今後も益々高まることは言うまでもない。

本研究は集積度の高度化の上で重要ないくつかの要素技術の確立に近づいたものであり、今後の改善・高性能化と実応用を目指した広範な集積デバイスへの適用により、さらなる展開と普及が期待される。

4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

優れた研究業績をもとに、日本及び外国から数多く顕彰された。主なものを記す。

中野義昭	Ribbon Award	平成 16 年 11 月
	フェロー称号	平成 17 年 9 月
	市村学術賞	平成 19 年 4 月
	エレクトロニクスソサイエティ賞	平成 19 年 9 月
清水大雅	Ribbon Award	平成 16 年 11 月
	JJAP 論文奨励賞	平成 17 年 9 月
柏木謙	第 4 回学生発明コンテスト奨励賞	平成 19 年 1 月
	平成 18 年度学術奨励賞	平成 19 年 3 月