

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

河口 仁司 (奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 教授)

主たる共同研究者

植之原 裕行 (東京工業大学精密工学研究所マイクロシステム研究センター 准教授)

津田 裕之 (慶應義塾大学 理工学部電子工学科 教授)

河村 裕一 (大阪府立大学先端科学イノベーションセンター-未来材料研究室 准教授)

3. 研究内容及び成果

次世代の超高速の光通信システムの実現には、信号処理を全て光で行う全光化が必須とされている。本研究では、光信号を電気信号に変換することなく、偏光双安定性を持つ面発光半導体レーザ(VCSEL)アレイ内の各レーザの偏光情報として、時系列の光信号を1ビットずつ記録でき、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの実現をめざした。この研究を実施する過程で、長波長VCSELの開発や、光パケットスイッチングに必要な光ヘッダ識別回路、時空間変換型光パケット生成・転送技術の実現も試みた。

以下グループ毎の研究内容成果について述べる。

超高速光メモリ研究グループ(奈良先端大学院大学)

980 nm 帯偏光双安定 VCSEL の作製

標準的な VCSEL を自作し、その共振器を構成する DBR(分布ブラッグ反射鏡)の一方を、反応性イオンエッチングを用いて正方形のメサ構造に加工し、ポリイミドで埋め込んだ。その結果、偏光状態に依存する電流 - 光出力特性を得て、双安定スイッチング特性が実現できた。この VCSEL は、光バッファメモリ等全光型信号処理の検討を行うのに十分な特性を備えている。光入力によるフリップ・フロップ動作も実現できた。偏光双安定性は、2つの直交偏光でレーザ発振が可能なように設計すれば、VCSEL の構造や作製プロセスによらず一般的に得られることが明らかになった。

偏光双安定 VCSEL のスイッチング特性

VCSEL の発振偏光が、光入力の偏光と同一の偏光にスイッチし、保持されることから、全光型フリップ・フロップ動作が実現できた。VCSEL において、偏光が直交する2つのモードは発振周波数が数 GHz 異なるのが一般的である。従って、0°モードから90°モードへスイッチする場合と、90°モードから0°モードへスイッチする場合、注入光の波長をそれぞれ最適化することにより、極めて小さな光入力でフリップ・フロップ動作を実現できた。双安定半導体レーザは、エネルギーが0.2~0.3 fJほどの光入力で安定なフリップ・フロップ動作を示した。この双安定半導体レーザは、最高で繰り返し10 GHzまでの動作が確認できた。

1ビット光バッファメモリ

AND ゲート動作およびメモリ動作を行う複数個の偏光双安定 VCSEL を用いた光バッファメモリを検討した。光入力信号の“1”又は“0”がVCSELの発振偏光として記録される。実験では、10 Gbit/s RZ信号に相当する、パルス幅50 ps、パルス間隔100 psの4ビット光信号列の中から、1ビット選択して記録し、再生するメモリ動作を実現した。

光バッファメモリの多ビット化とシフトレジスタ機能

VCSEL を2個並列に用いて、2ビットの光バッファメモリ動作を実現した。前に述べたように、光入力信号の

“1”又は“0”はVCSELの発振偏光として記録される。このVCSEL(VCSEL1)の発振光を2番目のVCSEL(VCSEL2)へ注入することにより、VCSEL2の偏光をスイッチし、情報を転送することができる。この機能をシフトレジスタ機能と呼んでいる。全ての組み合わせ、つまり、“0” “1”, “1” “1”, “1” “0”, および “0” “0”の転送について実験的に実証した。この結果から、本研究の最大の目標であるシフトレジスタ機能付光メモリが実現できたと言える。

1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL とフリップ・フロップ動作実現

VCSELの分布ブラッグ反射鏡と活性層の形状・大きさを設計し、その設計に基づき1.55 μm 帯VCSELを外部に作製委託し、偏光双安定動作および全光型フリップ・フロップ動作を実現した。最低次の横モードで動作し、基板結晶の $[1\bar{1}0]$ 軸方向と $[110]$ 軸方向のどちらかに電界が向く直線偏光で発振した。発振偏光に直交した光を注入することにより、全光型フリップ・フロップ動作を実現した。この結果は、光通信波長帯の光バッファメモリ実現につながる大きな研究成果である。

光データ処理研究グループ(東京工業大学)

光パケットの行き先情報ラベル識別器の実現を目的として、光デジタル・アナログ変換器を用いた高速光ラベル識別技術の確立と半導体集積化を目指した。半導体ハイメサ導波路構造での4ビット動作を10 Gbps および40 Gbps で確認した。異なるラベル入力に対する異なる振幅を持つ出力信号をパルス幅拡張を行うことにより、40 Gbpsでのラベル識別動作も実現した。また光パケットスイッチのプロトタイプを構築し、300 ns以下の遅延でのパケット転送を実現した。

時空間変換光制御方式研究グループ(慶応義塾大学)

光パケット生成のための時空間変換処理を行うキーデバイスであるアレイ導波路回折格子(AWG)の性能向上のため、V字型微小曲げ導波路構造及び低屈折材料充填溝構造を提案し、従来のAWGと同程度の性能を約1/10の寸法で実現した。この新構造を活用するとともに、スラブ導波路内レンズ構造を有する空間光変調器集積用AWGを試作し、パルス列発生と制御を行った。また、スペクトル位相符号化デバイスを試作し、光パルス符号化実験に成功した。

結晶成長研究グループ(大阪府立大学)

InGaAsSbN長波長帯量子井戸レーザの作製を、プラズマアシスト分子線結晶成長法(MBE)を用いて行った。GaAs基板上の波長1.3 μm 帯量子井戸レーザに関しては、Sb原子濃度と結晶の物性の相関を解明するとともに、Sb濃度2.5%以上にすることにより高品質のレーザが作製可能であることを示した。また波長2 μm 帯量子井戸レーザに関しては、210 Kでレーザ動作を実現した。しかし、目標とした長波長VCSELの作製には至らなかった。

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

本研究では、将来の光通信システムにおける全光型信号処理を目指して偏向双安定面発光半導体レーザ(VCSEL)を用いたシフトレジスタ機能をもつ光メモリの原理検証に成功した。周辺技術として光ヘッダ識別回路、時空間変換型光パケット生成・転送技術、長波長VCSEL開発のための結晶成長の研究も含まれる。これらの課題に関して有用な知見が得られており論文発表、学会発表がなされている。発表論文数は、英文43件、和文1件、口頭発表は、国際会議60件、国内会議71件、ポスター発表は国際会議9件、国内会議5件である。この他、国際会議で12件、国内会議で9件の招待講演を行っている。また、特許は国内8件を出願している。

2ビット光バッファメモリの書き込み/読み出しとシフトレジスタ機能などの基本的な機能検証は980nm帯の光回路にて行われたが、研究期間の後半では設計したVCSELを外部に製作依頼することにより、1.55 μm 帯でも、偏光双安定VCSELとフリップ・フロップ動作を実現しており、長距離光通信帯での適用可能性を示したことは意味がある。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究は偏光双安定性を用いる点が独自の創造的アプローチであって、小規模であっても実用になる独自の全光システムが構成できる可能性があるため、その技術的インパクトは大きい。所期の目標であった全光型超高速バッファメモリの実現に対し、1ビットの10Gbpsのフリップフロップ動作の確認やシフトレジスタ機能の実証など基本的な成果が得られている。面発光レーザはこれからのフォトニックネットワークで主役になることが期待できる光源であり、成果として示された偏波を用いた双安定メモリ動作は将来のフォトニックネットワークに貢献すると考える。現段階ではファイバー系での機能実現であるが、光メモリの最大のメリットである空間光学系による並列動作や多ビット化などに成功すればブレークスルーにつながる可能性がある。なお、このアプローチにより、どのようなメモリ規模や速度が期待でき、それがどのような特色ある応用に適しているかの位置づけを明確にすることが必要と考える。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

超高速光メモリ研究グループ(奈良先端科学技術大学院大学)で推進した研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金、特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」の中の計画研究「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理」(平成17年度 - 平成20年度、研究代表者 河口仁司)、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)による「長波長偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光パケットスイッチノードに関する研究開発」(平成19年度 - 平成21年度、研究代表者 河口仁司)の研究へ発展している。結晶成長研究グループ(大阪府立大学)ではInP基板上InGaAsSbN系のMBE成長に関する研究が、企業との共同研究へ展開し、そのテーマが次世代戦略技術実用化開発助成事業(NEDO)に採用された。

受賞については、(1) 河口仁司:電子情報通信学会フェロー(2006年9月20日)「半導体光非線形機能デバイスに関する先駆的研究」、(2) 鈴木他,IEICE ELEX Best Paper Award in the year 2005 (2006年9月20日)“Planar lightwave circuit dispersion compensator using a compact arrowhead arrayed-waveguide grating,” IEICE Electronics Express, Vol. 2, No. 23, pp. 572-577(2005).、(3) 澤田他 Best Paper Award(2007年6月). “Investigation of Operation Tolerance of a Semiconductor Optical Digital-to-Analog Converter on Phase and Intensity Fluctuation”, Conference on Optical Internet / Australian Conference on Fiber Technology (COIN/ACOFT2007), Melbourne, Australia, June, 2007 .が挙げられる。