

デジタルフォトンクス -光エレクトロニクスの パラダイムシフト Digital Photonics -Paradigm Shift in Optoelectronics

中野 義昭 (NAKANO, Yoshiaki)
東京大学・先端科学技術研究センター・教授



研究の概要

代表者がこれまで研究してきたデジタル光素子群（光論理ゲート、光フリップフロップ、非相反光素子）を進化発展させ、これら異なる素子を単一半導體基板にモノリシック集積するプロセス技術を開拓し、最終的に千素子級の大規模デジタル光集積回路（Large Scale Digital Photonic Integrated Circuit:PLSI）のプロトタイプを世界で初めて試作実現せんとしている。

研究分野：工学
研究費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・機器工学
キーワード：光デバイス・光回路、半導体光集積回路

1. 研究開始当初の背景

従来の光デバイスはその殆どがアナログデバイスであって、デジタル処理を行うためには、光を一度電気信号に変換し、電子回路により処理し、再び光信号に戻す必要があった。しかし、超高速・超大容量の光信号をデジタル処理するにあたってその都度、光→電気変換、電気→光変換を行っている現在のやり方では、速度、発熱、サイズおよび、何より消費電力の点で限界があることは明白である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、代表者がこれまで培ってきた半導体モノリシック光集積回路技術に依拠して、低消費電力、小型かつ集積化可能な全光論理ゲート、全光フリップフロップ、非相反光素子を試作開発し、これら異なる素子を単一半導體基板にモノリシック集積するプロセス技術を開拓して、最終的に千素子級の大規模デジタル光集積回路（PLSI）のプロトタイプを世界で初めて試作実現することである。この過程を通じて、エレクトロニクスの世界に、本格的なデジタル光回路技術体系（デジタルフォトンクス）の時代をもたらさんとするものである。

3. 研究の方法

本研究を実行する組織は、プロセス技術の開発を行うチーム、素子試作を担当するチーム、素子の実装と評価測定応用を担当するチームから構成されているが、各構成員は複数のチームに所属しシームレスな活動を展開している。

4. これまでの成果

(1) G2 全光論理ゲートデバイスの開発：従来の全光スイッチを格段に小型化するために、能動多モード干渉計(MMI)と、それを相互位相変調領域に集積化

した全光論理ゲートを、InP系集積光デバイスプロセスに基づいて試作した。その結果、 $1.2 \times 0.4\text{mm}$ のサイズで、入力制御光パワー7dBm時に、10dBの全光スイッチング消光比を得た。

(2) G2 全光フリップフロップデバイスの開発：まず本研究の出発点となる分布ブラッグ反射鏡(DBR)集積MMI双安定レーザ(BLD)型全光フリップフロップについて、その波長可変化を行った。その結果、波長可変幅3.1nm、消光比24.7dB、副モード抑圧比21.5dBなどの優れた性能を得た。

さらに、DBRとマッハツェンダ干渉計(MZI)型BLDを組み合わせた新たな全光フリップフロップ素子を研究開発し、動作波長範囲として58nmを得た。

(図1)。同素子の動特性を評価し、2.5pJの入力光パルスに対し、夫々319ps以下、68ps以下の立ち上がり/立ち下がり時間を得た。素子性能の限界を知るため、結合レート方程式によるモデリングと動特性シミュレーションを行った。

さらに、同素子に基づいて、これまでの光フリップフロップに欠如していた光クロック入力ポート(Dポート)の導入を図り、光クロック信号に同期したフリップフロップ出力を得ることに成功した。

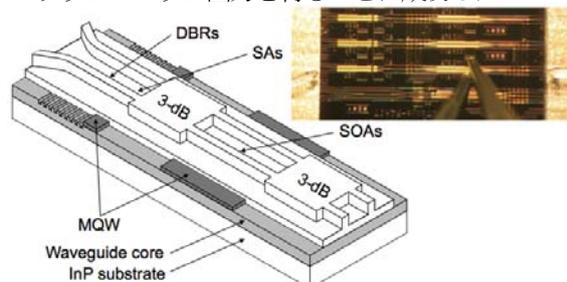


図1. MZI-BLDとDBR集積化した新たな全光フリップフロップ素子の概念図とチップ上面顕微鏡写真。

(3) 光バッファメモリの開発: $1 \times N$ マトリックス光スイッチと小型光遅延線アレイを集積化した構成の新たな光バッファメモリの研究開発を行った。その重要な構成要素である InP フェーズドアレイ型マトリックス光スイッチの開発を行い、 1×5 , 1×8 , 1×16 とスイッチ規模を順次拡大し素子を実現して来た。試作された光スイッチを用いて、光ラベルによる 160Gbps RZ-OOK パケットおよび 10Gbps \times 12 波長 DPSK パケットの 1×16 スwitchング実証実験を行い、前者は 0.7dB, 後者は 0.6dB の僅かなパワーペナルティしかなくエラーフリー動作を得た。さらに、同光スイッチと超小型コイルファイバを組み合わせ実用的な全光バッファを世界で初めて開発することに成功し、光ファイバー通信国際会議(OFC) ポストドッドライン論文として採択されるに至った。

さらに平成 22 年度には、 1×10 光スイッチの 2 段階構成による世界最大の 1×100 のスイッチ規模を有する大規模光集積回路(PLSI)を試作・実現した(図2)。

(4) G2 非相反光デバイスの開発: 非対称な断面形状を有する光導波路と非相反位相シフトを組み合わせた非相反偏光変換素子を研究した。

開発した非相反損失光デバイスをリング共振器レーザ内部にモノリシック集積することに成功し、非相反損失光デバイスに印加する磁場の方向を反転させることにより、リングレーザの発振方向を制御できることを実証した。

(5) 集積プロセス技術とデジタル光集積回路の開発: デジタルフォトニクス実現の鍵となる有機金属気相エピタキシ(MOVPE)における選択成長技術を開発し、MMI 型全光フリップフロップと、SOA-MZI 型全光論理ゲートをモノリシック集積化したワンチップ全光パケット処理回路を試作した(図3)。さらに上記の光スイッチと光遅延線を組み合わせた光バッファ回路の集積化をさらに推し進め、光遅延線、光カプラ、および、可変光減衰素子を石英系プレーナ光波回路上にワンチップ集積し、光スイッチとハイブリッド実装したコンパクトな光バッファ集積回路の作製に成功した。

5. 今後の計画

平成 23 年度においては、

- (1) 全光フリップフロップの高度化
- (2) 導波路型偏光変換素子の解析と試作
- (3) デジタル光集積回路プロトタイプ的设计解析
- (4) デジタル光集積回路プロトタイプの試作評価
- (5) PLSI 実現へ向けた集積素子数の拡大の各項目について研究を行う計画である。

また平成 24 年度(最終年度)においては、

- (6) デジタル光デバイスによる FPGA
- (7) 多数の光入出力ポートを一括接続する実装技術
- (8) PLSI の実現とデジタルフォトニクスの確立の各項目を研究する計画である。

6. これまでの発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- 1) Takuo Tanemura, Ibrahim Murat Soganci, Tomofumi Oyama, Takaharu Ohya, Shinji Mino, Kevin Williams, Nicola Calabretta, Harmen J. S. Dorren, and Yoshiaki Nakano, "Large-capacity compact

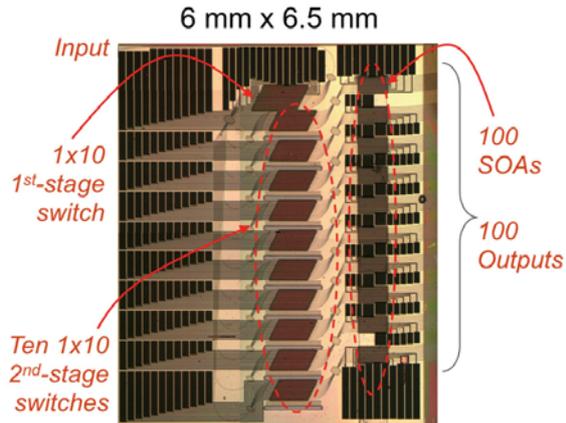


図2. InP 大規模光スイッチ集積回路のチップ写真。

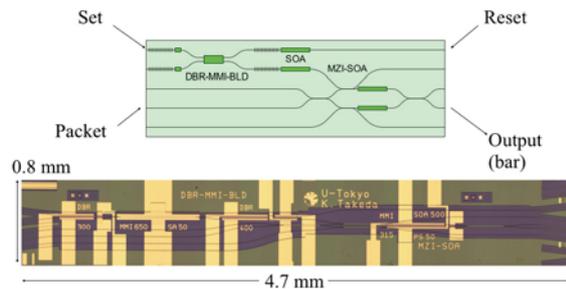


図3. 光フリップフロップ・光ゲート集積回路チップ写真。

optical buffer based on InP integrated phased-array switch and coiled fiber delay lines", Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 4, pp. 396-402, February 15, 2011.

- 2) Koji Takeda, Mitsuru Takenaka, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano, "Experimental study on wavelength tunability of all-optical flip-flop based on multimode interference bistable laser diode", IEEE Photonics Journal, vol. 1, no. 1, pp. 40-47, June 2009.

[学会発表] (計 68 件)

- 1) Ibrahim Murat Soganci, Takuo Tanemura, Koji Takeda, Masaru Zaitzu, Mitsuru Takenaka, and Yoshiaki Nakano, "Monolithic InP 100-port photonic switch", Proceedings CD, 36th European Conference on Optical Communications (ECOC 2010), PD1.5, pp. 1-3, Torino, Italy, September 19-23, 2010.

- 2) Koji Takeda, Mitsuru Takenaka, Takuo Tanemura, Masaru Zaitzu, and Yoshiaki Nakano, "Single-chip all-optical packet processor based on all-optical flip-flop monolithically integrated with MZI-SOA switch", Technical Digest CD, Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC 2010), OThS2, pp. 1-3, San Diego, California, March 21-25, 2010.

ホームページ等

<http://www.ee.t.u-tokyo.ac.jp/~nakano/lab/kiban-s/>