

佐藤 健一

名古屋大学大学院工学研究科・教授

超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術

§ 1. 研究実施の概要

情報システムの低消費電力化は次世代ネットワーク構築における焦眉の課題となっている。この課題の解決に向けたブレークスルーをもたらす技術として、光ルーティング技術(フォトニックネットワーク技術)が有る。本技術では光のパッシブデバイスによるルーティングを用いる事により、通信ノードにおける電気レイヤの処理を大幅に削減し、通信ネットワーク全体での抜本的な低消費電力化を達成することができる。本研究では低消費電力化をネットワーク全体でとらえ、リンクとノードを構成要素とし、HAN (Home Area Network) / LAN (Local Area Network) から WAN (Wide Area Network) コア並びにメトロネットワークまでのネットワーク全体をあたかも一つのサーキットボードとして、低消費電力化の観点から最適化を図る。フォトニックネットワーク技術における各種の通信方式(光ストリーム、光バースト等)が有する超低消費電力のポテンシャルを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャ、ネットワーク設計概念を明らかにするとともに、それを構成する超低消費電力ノードシステムの構成並びに究極の低消費電力性能を明らかにする。

平成 21 年度は、フレキシブル光クロスコネクタノード設計に関して、マトリックススイッチをベースとする波長群クロスコネクタノードの新しい構成法を考案した。本構成は従来構成に比べスイッチ規模を 1/5 以下に縮小できる事を実証した。これを基に実際の機能検証に向けたハードウェアの部分試作を行っている。ネットワークアーキテクチャに関しては、メトロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して、これまでに波長群の導入によりスイッチ規模を大幅に縮小できることを明らかにしてきた。平成 21 年度には、波長群の導入による波長パスのブロッキング確率の詳細な性能評価を行い、僅か(～ 7.6%)なスループットの低下を許容することで、スイッチ規模を 70%程度縮小できる事を明らかにした。この成果に基づき、前年度試作(3機関共同)したノードシステム実現に必要なキー部品の各種光伝送特性を評価し、良好な特性である事を実験的に確認した。さらに、波長群クロスコネクタノードの動作を実証するために、これらのキー部品(波長群合

分波器、マトリクススイッチ、波長合分波器など)からなる波長群クロスコネクトノード装置を作製し、その性能を総合的に評価した。また、横須賀地区に敷設された光ファイバを伝送路として用いた現場実験を行い、映像・データの伝送に関して、所期の性能が実現されていることを確認した。

また、メトロポリタンエリアや LAN への適用を目指したパッシブデバイスを用いた波長ルーティングシステムの研究では、昨年度までの成果・知見を活かし、波長ルータ部分で用いられるアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed-Waveguide Grating) の設計に工夫を加えることで、2 つ以上のネットワークを相互接続して拡張する手法を提案し、その動作検証に成功した。今後は、波長群クロスコネクトノードの検証機開発から得られた知見を踏まえて、小型化・低消費電力化と使い勝手のバランスを最適化した装置構成の検討を進める予定である。

光デバイスの開発は、超低消費電力化を目指す各種光ネットワーク研究に必要な平面光波回路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) 型専用デバイスの開発と PLC 光スイッチ自体の超低消費電力化を図る基盤技術開発を進めてきた。多くの時間を割いてきた専用デバイス開発は本委託研究も終盤を迎え大部分は終了しており、革新的な技術開発が行える環境となっている。そこで今年度は波長群クロスコネクトノードの更なる小型・大容量化を目指し、多数の波長群合分波フィルタと光スイッチを 1 チップ上に集積したモノリシック WBSS (Wave-band Selective Switch) 回路の開発を進めた。これは本委託研究で培ってきた技術を生かし、導波路型光デバイスでは最大規模の集積度と多機能化に挑戦した光デバイスであり、来年度初頭の実現を目指して進めている。一方、基盤技術開発では、PLC 光スイッチの消費電力を 1/100 以下にすることを目指しており、低損失な石英系導波路と電気光学効果を利用するニオブ酸リチウム (LiNbO_3) 導波路を組み合わせた光スイッチ (電圧駆動のためデバイスでの消費電力≒ゼロ) の検討を一昨年度から進めてきた。光デバイス部分で電力をほとんど消費しないため駆動回路も含めた消費電力で評価することとし、今年度に様々な駆動回路を検討した結果、1/100 近くまで低減出来る見通しを得た。更なる低消費電力化を目指し、駆動方法や回路構成について検討を進めている。

以上の検討を基に、コアネットワーク部におけるノードシステムとして、従来の電気ルータによる構成と比較して 1/100~1/10 の低消費電力化の見通しを得た。ここで前者は広範囲に Optical FCS (Fast Circuit Switching) / バーストが導入された場合 (終端トラフィックの 80%程度)、後者は終端トラフィックがパケット主体の場合である。また、数 10km 程度をターゲットとしたメトロ/LAN における波長ルーティングシステムにおいては、電力消費の大半を占める電気ルータ装置を、電力を消費しないパッシブな波長ルーティングデバイスに置き換える効果によって、従来のシステムと比較して 1/10 以下の低消費電力化の見通しを得た。更に、光デバイスのレベルからも新しい構造と材料の適用を進めており、従来に比べ 1/100 程度まで低減出来る見通しを得た。

§ 2. 研究実施体制

(1)「名古屋大学」グループ

① 研究分担グループ長:佐藤 健一(名古屋大学大学院、教授)

② 研究項目

超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

- ・ フレキシブル光クロスコネクトノードの設計
- ・ 超低消費電力光ネットワーク設計法の開発
- ・ ラベルスイッチ並びに FCS ネットワーク実現法
- ・ アダプティブ光ネットワークの設計法の開発
- ・ ネットワーク実験

(2)「NTTフォトニクス研究所」グループ

① 研究分担グループ長:高橋 浩(日本電信電話株式会社、研究グループリーダー)

② 研究項目

- ・ 波長ルーティング装置及びネットワークノード装置の開発
- ・ 光ラベル処理装置の開発
- ・ アダプティブネットワークインタフェースの開発
- ・ ネットワーク実験

(3)「NTT エレクトロニクス」グループ

① 研究分担グループ長:大森 保治(NTTエレクトロニクス株式会社、技師長)

② 研究項目

- ・ 超低消費電力光ルーティングネットワークに必要な専用 PLC デバイスの開発
- ・ PLC 光スイッチの抜本的低消費電力化を実現する基盤技術の開発

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

①超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

超低消費電力光ネットワークアーキテクチャとして、これ迄フォトニックネットワーク技術における波長ルーティングを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャの検討、光クロスコネクトノード並びにキーとなる光機能素子構成の研究開発を進めてきた。本年度の主要な成果を以下にまとめる。

ア. フレキシブル光クロスコネクトノード

ネットワークのスループット拡大の観点からストリームとして波長パスに加えてウェーブバンドパス(波長群パス)を利用する階層化光パスネットワークは重要である。これを実現する上でキーとなる階層化光クロスコネクトノードに関して、マトリックススイッチをベースとする新しい光クロスコネクトの構成法を考案した。本提案構成を用いることにより、従来構成に比べスイッチ規模を 1/5 以下に

縮小できる事を実証した。図1に提案構成の概要を示す。図2に、提案構成のスイッチ規模を従来構成と比較したものを示す。なお、パラメータは、波長群の Add/drop 率=0.375、波長数 64 波／ファイバ、8 波／波長群 である。

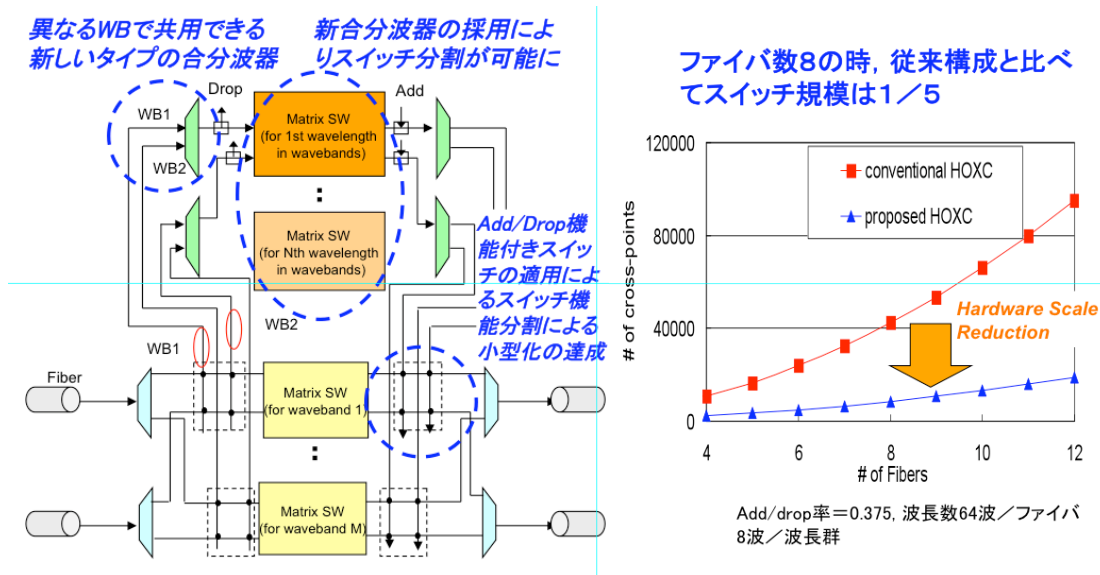


図1 新提案階層化光クロスコネクタノード構成

図2 スイッチ規模縮小効果の評価

イ. 接続リングネットワーク[論文 4]

メトロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して、波長群の導入によりスイッチ規模を大幅に縮小できることをこれまでに明らかにしてきた。その一方、波長群の導入により波長パスのブロッキング確率が上昇する。このトレードオフを定量的に評価する為に、整数線系計画問題 (ILP: Integer Linear Programming) による定式化と性能評価を進めてきた。今回、各種のパラメータを変化させ、スイッチ規模縮小効果とルーティング能力低下のトレードオフを詳細に評価した。その結果、図3に示す様に、3リングを接続するノードにおいて、波長群の導入によるルーティング能力の僅かな低下 (7.6 %) で、70 % 程度のスッチハードウェアを削減できることを初めて明らかにし、接続リングネットワークにおける波長群の導入の有効性を実証した。また、重要なパラメータの一つである Add/drop 率に関しては、その値が 1/2 で有れば、波長群のバンド幅の増加に対するルーティング能力の低下は殆ど無いことが検証された。また、Add/drop 率が1/3 の場合は、波長群幅が 8 程度で有ればルーティング能力の低下は 10% 程度に抑えられることが分った。

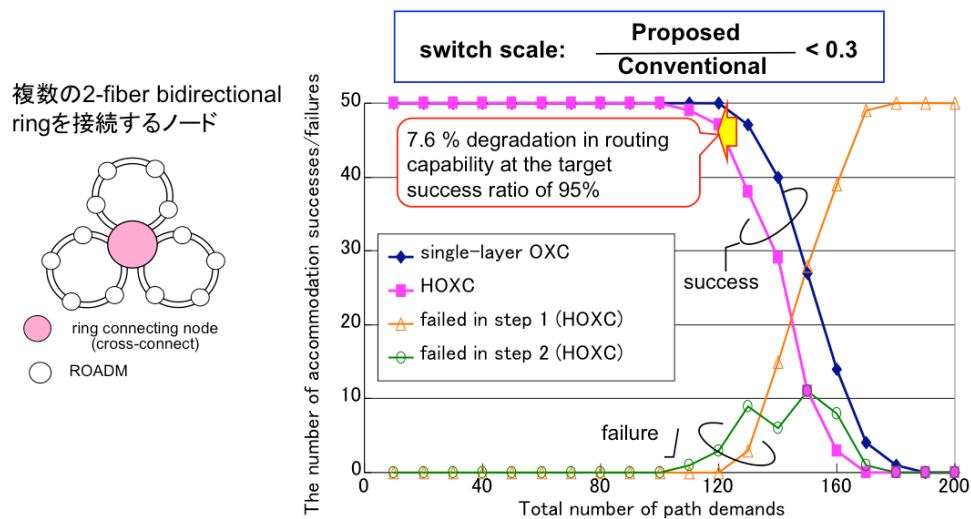


図3 接続リングノードにおける波長群の導入によるルーティング能力の低下

ウ. 接続リングノード装置の開発 (3機関共同)

前記イの評価の結果、接続リングネットワークに波長群を導入し、僅かなルーティング能力の低下を許容することにより、接続ノードのスイッチ規模を大幅に縮小できることが明らかになった。この検討により、従来大規模なスイッチへの適用が困難であったPLC型デバイスが接続リングノードの

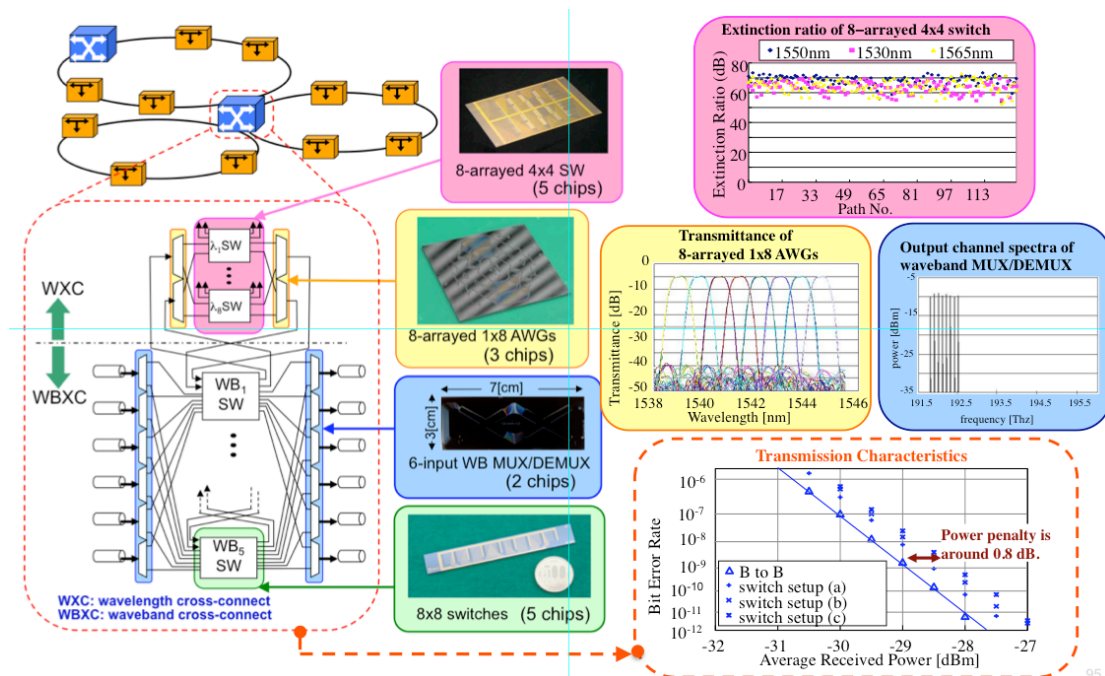


図4 PLC デバイスを用いたリング接続クロスコネクトシステム

スイッチに適用できることが分かった。そこで必要なキーデバイスを開発し伝送実験により試作ノードシステムの光伝達特性を検証した。その結果、光受信レベルの劣化は 0.8 dB と小さく、PLC 型デバイスの適用により、極めて小型な接続リングノードが実現可能であることを初めて実証した。

②超低消費電力光ネットワーク構成技術

ア. 波長ルーティング装置の開発[論文 5]

パッシブデバイスを用いた波長ルーティングネットワークの研究においては、昨年度までに AWG 波長合分波器からなる波長ルータの構成について検討を行い、フレキシブルな帯域割り当てができるよう、不均一な帯域幅を得る手法、可変な帯域幅を得る手法、動的に帯域・方路を変更する手法について、提案および実験による検証を行ってきた。これら単独のネットワークの機能向上に加えて、今年度はこれまでに得られた知見をさらに発展させて、機能を維持したまま複数のネットワークを相互接続する手法を見出し、その検証実験を行った。図 5 に示すように、波長ルータ用 AWG の周回性を生かし、接続するルータの周期(U:波長間隔で規格化したフリースペクトルレンジ)を互いに素な整数(図では7と6とした)とすることが特徴である。

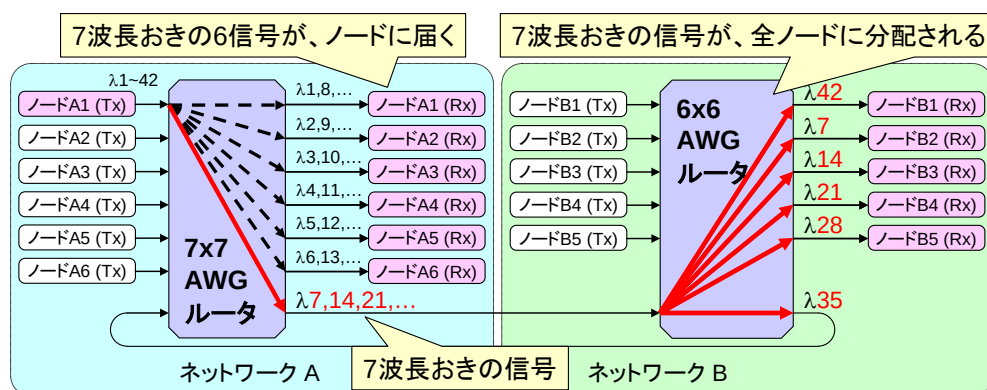


図 5 ネットワークの相互接続方法の原理

例えばネットワーク A の第1ノードから 42 波長の信号を送出すると、7×7AWG ルータを経て 7 波長おきの 6 信号がネットワーク A 内の各ノードに届く。また、別の 7 波長おきの 6 信号がネットワーク B に送られるが、この 6 信号はネットワーク B 内の 6×6AWG ルータを経て、ネットワーク B 内の各ノードに届けられる。同様にして、ネットワーク内の各ノードから、2 つのネットワーク内の全てのノードに信号を届けることができ、個別のネットワークと同じフルメッシュの波長パスを形成できる。なお、このシステムでは、原理的に複数の送信ノードから同じ波長を送っても混信はしない。この結果、ネットワークの相互接続による拡張が可能な、メトロポリタンエリアネットワークや LAN の構築が可能であることを明らかにした。

イ. 波長群クロスコネクトノードの開発

「①超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ研究」の成果に基づいて、波長群クロスコネクトノードの実証装置を設計し、「③超低消費電力光ルーティングネットワーク用 PLC 研究」の研究成果である、実証装置の実現に不可欠な PLC を用いた種々の部品(具体的には、AWG 型波長群合分波器、マトリクススイッチ、波長合分波器)を用いて、実証装置を完成させた(図 6 にノード構成と、作製した装置の写真を示す)。

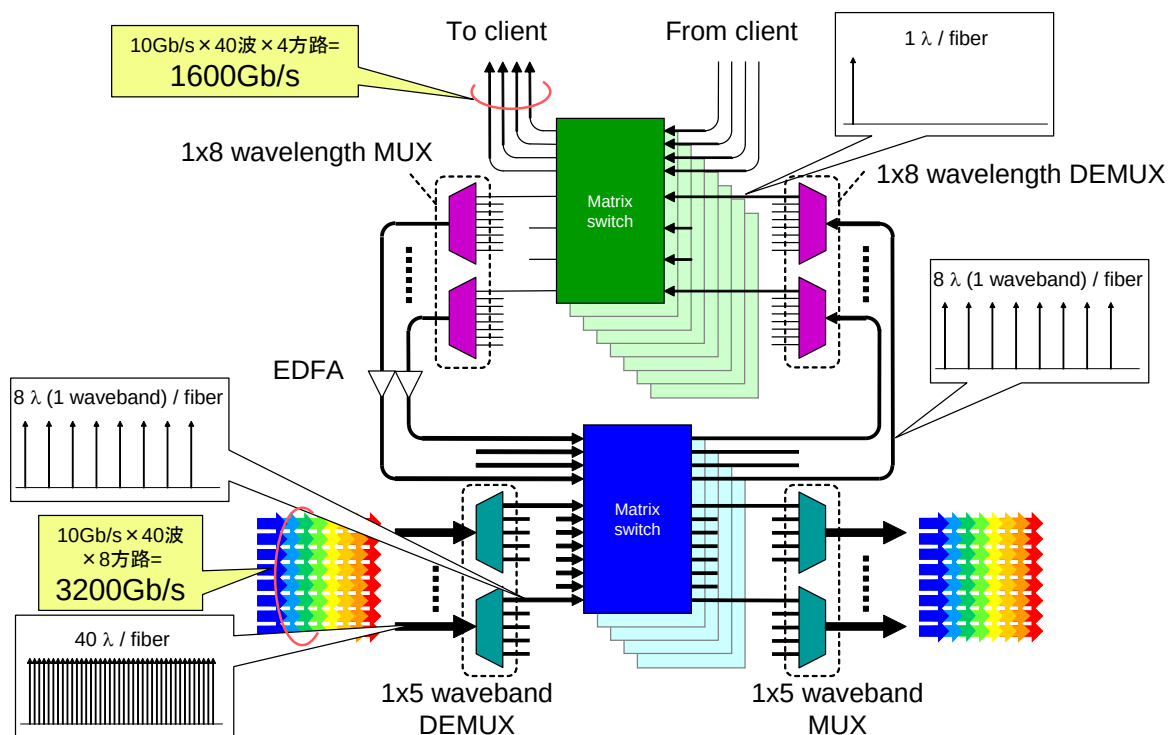


図6 ノード内構成と試作したデモ実験装置の写真

本実証装置を、横須賀地区に敷設された光ファイバ(17km×2 区間)を用いて接続し、映像及びデータを伝送する現場実験を実施した。Node 1は送信専用、Node 4は受信専用であり、Node 2およびNode 3が波長群クロスコネクタノードである。Node 1から送信される多数の10Gbit/sの波長多重信号から任意の信号のみをNode 2あるいはNode 3で選択して受信できるよう各信号の経路を個別に切替えることができる。このノード装置は最大で、伝送路側 3200Gbit/s、ルータ側 1600Gbit/s、合計 4800Gbit/s の光信号を処理可能であり、同程度の規模の電気のクロスコネクタ装置と比較して、ビット当たりの消費電力は1桁以上低減されている。2回ノードを通過させた場合、

特性劣化(受光感度ペナルティ)は約 0.4dB 以下であり、実用上問題なく動作することが確認できた。なお、本研究成果は、光通信分野での最大の国際会議(Optical Fiber Communication Conference, San Diego, March 2010)においてポストデッドラインペーパーとして採択され、発表を行った。

③超低消費電力光ルーティングネットワーク用 PLC 光デバイス

抜本的な低消費電力化を目指し開発を進めてきた波長群クロスコネクトノード、波長ルーティング装置、光ラベル処理装置等の各種通信ネットワークの実現に必要な専用デバイスの開発を、最先端な石英系 PLC 技術を駆使して進めてきた。専用デバイスはシステム実験に先駆けて開発する必要があることから、研究開始当初から様々なデバイスを精力的に開発してきており、研究の最終年度を迎えるに当たりデバイス開発はほぼ終了した段階にある。そこで今年度は、革新的なデバイス開発に挑戦出来る環境が整ったことから、専用デバイス開発の集大成として、波長群クロスコネクトノードの小型・大容量化や高機能化を実現するためのモノリシック WBSS 回路の開発を進めた。これは、図 7 に示す通り1入力 10 出力の波長群選択スイッチで、1つの AWG 型波長群分波フィルタと 10 個の AWG 型波長群合波フィルタ、そして出力ポートを選択するための 10 個の 1×16 スイッチ(6 ポートはサービスポート)から成り、全ての機能素子を 1 チップ上に集積した光デバイスである。取り扱う波長数も波長間隔を従来の 100GHz から 50GHz とすることで 40 波長から 80 波長と 2 倍になるなど、導波路型光デバイスでは最大規模の集積度とスループットを有している。これは一昨年度から3チームが共同で各種の集積デバイスを継続的に試作してきた成果が生かされており、現在は PLC チップの試作が完了したところである。H22 年度初頭のモジュール完成を目指し試作を進めている。

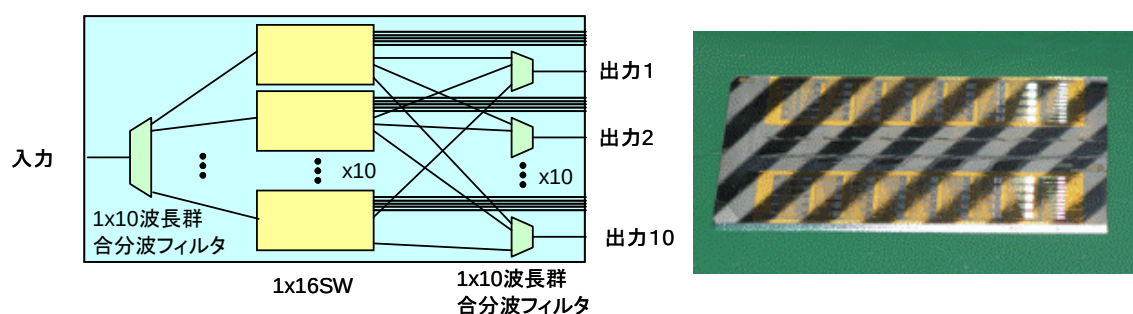


図7 1x10 波長群選択スイッチ(WBSS)の構成図と試作した PLC チップ

一方、デバイス自身の低消費電力化も重要なテーマであり、研究開始当初から PLC 光スイッチの消費電力を従来の 1/100 に低減するという困難な目標を掲げ基盤技術開発を進めてきた。PLC 光スイッチの基板材料の変更や極限的加工技術の適用などを試み 1/10 まで低減したが、それが限界であることが明らかになったため、低損失な石英系導波路と電気光学効果を利用するニオブ酸リチウム(LiNbO_3)導波路を組み合わせた光スイッチ(電圧駆動のためデバイスでの消費電力≒

ゼロ)の検討を一昨年度から進めてきた。駆動回路を含む消費電力として 1/100 以下が実現出来る可能性を探っており、今年度に様々な駆動回路を検討した結果、ABC (Automatic Bias Control)回路と SHA (Sample-and-Hold Amplifier)を組合せ、常に制御を行わない間欠動作を採用することで 1/100 程度まで低減出来る見通しを得た。更に、駆動方法や回路構成を工夫することで 1/100 以下を目指す。

以上の検討を基に、コアネットワーク部におけるノードシステムとして、従来の電気ルータによる構成と比較して 1/100～1/10 の低消費電力化の見通しを得た。ここで前者は広範囲に Optical FCS /バーストが導入された場合(終端トラフィックの 80%程度)、後者は終端トラフィックがパケット主体の場合である。また、数 10km 程度をターゲットとしたメトロ/LAN における波長ルーティングシステムにおいては、電力消費の大半を占める電気ルータ装置を、電力を消費しないパッシブな波長ルーティングデバイスに置き換える効果によって、従来のシステムと比較して 1/10 以下の低消費電力化の見通しを得た。更に、光デバイスのレベルからも新しい構造と材料の適用を進めており、従来に比べ 1/100 近くまで低減出来る見通しを得た。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- (1) K. Takiguchi, H. Takahashi, and M. Okuno, “Integrated-optic digital-to-analogue converter for recognizing multi-wavelength pulse patterns” Electronics Letters, vol. 45, No. 9, April 23, 2009, pp. 466-467
- (2) K. Sato and H. Hasegawa, “Optical networking technologies that will create future bandwidth abundant networks,” Journal of Optical Communications and Networking, Special Issue on Optical Networks for Future Internet, invited, vol. 1, No. 2, July 2009, pp. A81-A93. A paper selected for Spotlight on Optics of OSA in July 2009.
- (3) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, S. Kamei, H. Takahashi, “Wavelength Path Reconfigurable AWG-STAR Employing Coprime-Channel-Cycle Arrayed-Waveguide Gratings,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, No. 14, July 15, 2009, pp. 1005-1007.
- (4) K. Ishii, H. Hasegawa, and K. Sato, “Wavelength assignment for concatenated ROADM ring networks and switch scale reduction in a concatenating node,” Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), vol. 2, No. 1, January 2010, pp. 67-79.
- (5) K. Ishii, O. Moriwaki, H. Hasegawa, and K. Sato, Y. Jinnouchi, M. Okuno, and H. Takahashi, “Development of hierarchical optical cross-connect system for ROADM-ring connection using PLC technologies,” Photonics Technology Letters, IEEE Volume: 22, No. 7, pp. 489-500.
- (6) O. Moriwaki, K. Noguchi, T. Sakamoto, H. Takahashi, “Full-mesh Wavelength Channel

Assignments over Interconnected Star Shaped Networks Employing Coprime-Channel-Cycle Arrayed-Waveguide Gratings” to appear in IEEE Photonics Technology Letters.

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 16 件)