テラビット超大容量光スイッチ

逸見 直也*, 高橋 成五*

Beyond Tera Bit per Second Capacity Ultra-Large Scale Optical Switch Fabric Technology

Naoya HENMI* and Seigo TAKAHASHI*

*日本電気株式会社C&Cメディア研究所 (〒216-8555 神奈川県川崎市宮前区宮崎4-1-1)

*C&C Media Research Laboratories, NEC Corporation (4-1-1 Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 216-8555)

1. はじめに

現在北米では、インターネットを中心としたマルチメディアサービスの発展により通信ネットワークに爆発的な容量拡大が必要とされており、今後このような容量拡大の動きは世界各地に波及すると考えられる。このような容量拡大に応える技術として、北米を中心に波長多重技術を用いた伝送容量の拡大が盛んに進められており、研究レベルではすでに各所でテラビットを越える容量の伝送実験が行われている¹⁾。一方、ネットワークを構成するための基本要素であり、主にネットワーク内での経済的な多重化、経路設定変更、ネットワーク状態の把握、ネットワーク障害時の自動復旧等の機能を果たすスイッチング技術に関しても、容量の拡大が伝送技術と並行して行われることが必要である。しかし、このスイッチング容量の拡大に関しては、従来から用いられている電気スイッチ技術の延長では超Tb/s級のスイッチを実現することが困難であることが判明しつつあるものの、ブレイクスルー技術はいまだ確立されていない。

我々は、現在この超大容量スイッチ技術を実現するブレイクスルー技術として光技術、特に波長多重技術を利用したテラビット超大容量光スイッチの研究・開発を行っている。本稿では、まず現在、我々が検討している半導体アンブゲートスイッチを基本要素とした波長多重／空間多重超大容量光スイッチ技術を紹介する。最後に、この技術を実用化するにあたり光実装技術に期待する項目をまとめる。

2. 波長多重／空間多重超大容量光スイッチ

本節では、まず将来の通信ネットワークに必要となる超大容量光スイッチへの要求項目をまとめ、次にこれを実現する手段である我々の提案する波長多重／空間多重光スイッチについて述べる。最後に我々の提案する光スイッチの利点をまとめる。

2.1 超大容量光スイッチへの要求項目

先に述べたように将来の超Tb/s容量通信ネットワーク

用スイッチ技術には、一般的に以下の要求項目の実現が必要である。

- 1) スイッチサイズとして、数100×数100以上の大規模スイッチ
 - 2) 完全非閉塞性（場合によっては、マルチキャスト機能も兼備）
 - 3) 数nsecでの高速切り替え機能（将来のセル／パケット単位での切り替えあるいは多重化応用を考えた場合）
- 等、である。1)の条件は、将来の数10波～100波以上の波長多重ネットワーク内において、波長ごとの切り替えを行う場合に不可欠な条件であり、2)は、クロスコネクタ等、従来のノード技術が必要とする条件、3)は、将来データサービスの多重化、グルーミングを行うルータやATMスイッチへの応用を考えた場合、つまりパケット／セル交換用光スイッチに必要となる条件である。

要求項目3)は、光波長ごとの経路張り替えを行う光クロスコネクタを実現する際には不必要な条件である。しかし、将来のルータやATMスイッチへの光スイッチ応用拡大を考慮して（光スイッチ素子自体の応用分野の拡大による量産化、ひいては低コスト化を期待するため）、我々は1)～3)のすべての条件を満たす光スイッチ構成を中心に超大容量光スイッチの研究・開発を進めている。

2.2 要求項目を満足する光スイッチ構成

以下では、前節で述べた要求条件を満たす光スイッチ構成に関して検討する。まず要求条件を満足するために光スイッチ素子に要求される条件を抽出して光スイッチ素子を決定した後に、光スイッチの構成方法（アーキテクチャ）を決定する。

前節で述べた要求条件1)、3)のスイッチサイズ（光増幅機能、低クロストーク特性が不可欠）と高速切り替え特性の必要性から、光スイッチ素子には光増幅特性、 -40dB 以上の低クロストーク特性、ナノ秒オーダーの高速スイッチング特性を有する半導体光アンブゲートスイッチ素子(SOAG)が適すると考える。この半導体アンブゲートスイッチは、将来の光集積化・量産化に優れ、多種多様な応

用用途が考えられるため、光スイッチ技術として最も期待できる光半導体素子である。

次にこの半導体光アンプゲートを用いた光スイッチの構成法を検討する。半導体光アンプゲートを用いて単純な大規模完全非閉塞空間光スイッチを構成する場合、本素子はシャッタ機能のみを有するため、分配選択型光スイッチを構成する必要がある。このような光スイッチ構成を実現するためには、以下の点が大きな課題である。

1) 膨大な数のSOAG (光スイッチ素子) を必要とする点 [(ポート数)²のオーダーのエレメント数]

2) 光スイッチ内での合分波損失に起因した信号対雑音 (S/N比) 劣化

3) 光スイッチ素子をメッシュ状に接続するため、複雑な光ファイバ配線実装技術が必要とする点

これらの問題を解決するために、我々は、光技術に独特な (電気技術にはない) 波長多重技術を利用して大規模光スイッチを構成するのに適した波長/空間光スイッチ構成方法を提案している。

我々の提案する光スイッチの構成をFig.1に示す²⁾。この光スイッチは、波長多重群で群交換する空間スイッチ部分と、波長多重された信号から1波長の信号を取り出す波長セクタの2段スイッチ構成を取る。

以下、簡単に提案する光スイッチの構成および動作を説明する。入力ポートはそれぞれあらかじめ特定な波長に割り当てられ、複数の異なる波長を割り当てられた入力ポートの出力が波長多重化されて波長群を構成する。それぞれの波長群は、エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて波長一括増幅され、各出力ポートへ分配される。分配された波長群は、以下に示す波長/空間光セクタにより選択され出力される。Fig.2に波長/空間光セクタの構成を示す。図中、初段SOAG群は、空間選択セクタにあたり、出力ポートでどの波長群を取り出すかを選択する光スイッチである。この初段SOAGで選択された波長群は、波長ルータ (AWG) を利用して波長分離され、次段

Fig.2 WD/SD optical selector configuration

SOAG群によって1波長信号が選択される。この空間選択セクタと波長選択セクタの2段構成のセクタにより、出力側は、いかなる入力信号光をも選択できることとなり、本光スイッチはマルチキャスト可能な完全非閉塞スイッチとなっていることがわかる [要求項目2)]。

2.3 提案する波長多重/空間多重光スイッチの利点

本来、波長多重技術を用いずに空間スイッチのみで光セクタを構成すると、各出力ポートに入力ポート数分のSOAGが必要となる。一方、本構成では光技術独特な波長群交換方式を用いて空間/波長の2段光セクタ構成を取り、SOAG数を大幅に削減している。Fig.3にスイッチ規模をパラメータとしたときのSOAG数と波長多重数との関係を示した。例えば、256×256のスイッチ規模を考えた場合、波長多重数16のときSOAG数が最小となり、単純な空間スイッチを構成した場合の1/8に削減される。このため、後述する256×256の光スイッチデモンストラータは、16波長多重技術を用いている。

次に、光スイッチ内における光信号損失に関して考える。単純な空間スイッチを構成する場合、例えば256×256では、光送信器から光受信器までに $(1/256)^2$ の光損失を生じる (256出力ポートへ分配損と、256個のセクタから出力さ

Fig.1 WD (Wavelength division) /SD (Space division) optical switch fabric configuration (256 ports × 256 ports)

Fig.3 Relationship between required SOAG number and employed wavelength number

れた信号を合波する合波損)。一方、我々の提案する波長多重／空間多重光スイッチでは、波長合分波損を零とすると、 $(1/256)^2 \times (\text{波長多重数})$ と波長多重数分だけ損失を低減できる〔256出力ポートへ分配損と、 $(256/(\text{波長数}))$ 個の次段SOAG群から出力された信号を合波する合波損〕。ここで、波長多重数分の損失が低減されているのは、波長多重／空間多重光セクタ内に波長ルータを導入し、従来空間的合分波の際に生じた分波損を削減したためである (Fig. 2 参照)。

また、実装面から見ると、波長多重した信号光を分配するため、次節で述べるように光セクタを1パッケージに実装すると、

- 光セクタへの光ファイバ入力数を (1 / 波長多重数) に大幅に削減できる
 - 波長多重した信号光を一括増幅できるため分配損の補償に用いる光増幅器の数が削減できる
- 等、の大きな利点がある。

3. 超大容量波長多重／空間多重光スイッチデモンストレータ

本節では、まず我々の提案する波長多重／空間多重光スイッチに基本光スイッチエレメントとして用いる半導体アンプゲートスイッチ素子に関して述べ、次に実際に半導体アンプゲートスイッチ素子を用いて試作した10Gb/s/ポート、256×256までポート数拡大可能な光スイッチの部分試作デモンストレータについて述べる。

3.1 半導体アンプゲートスイッチ素子

Fig. 4 に、今回光スイッチデモンストレータを試作するにあたって新たに開発した半導体光アンプゲート (SOAG) モジュール写真を示す。光スイッチの装置化を進めるためには、基板上での実装面積削減のためSOAGモジュールは小型で、(我々の提案する構成方法に適した) アレイ実装する必要がある。そこで今回我々は、モジュール形状を細長化し、アレイ実装に適した半導体アンプゲートモジュールの開発を行った (体積比で比較すると1/4)。

Fig. 5 に、今回開発した半導体アンプゲートスイッチモ

Fig.4 Semiconductor amplifier gate module

ジュールの特性をまとめる。Fig. 5 (a)は、ゲイン対出力光強度の関係、Fig. 5 (b)は、応答速度測定結果、Fig. 5 (c)は、光スイッチとしてのオンオフ比特性を示している。どの特性においても、先に述べた大規模光スイッチを構成するために必要な所要を満たしていることが確認された。

3.2 2.56Tb/s超大容量波長多重／空間多重光スイッチの部分試作

前節で述べた半導体アンプゲートスイッチモジュールを基本光スイッチエレメントとして、10Gb/s/ポート、256×256波長／空間多重光スイッチ (2.56Tb/s容量) の分配部と2波長多重／空間多重光セクタ試作を行った。Fig. 6 に16波長多重技術を適用した今回試作機の写真を示す³⁾。本試作機は、Hi-PAS規格に準拠したプリント配線板 (320×280mm²) 上に光部品、電気部品を実装し、光信号入出力およびスイッチ制御電気信号の接続はバックボードを介して行った。また、架内に強制空冷を施し、電気回路

Fig.5 (a) SOAG module gain vs. output power

Fig.5 (b) SOAG module switching speed response

Fig.5 (c) On/off ratio distribution

Fig.6 Optical switch prototype shelf

および光素子から発生する熱を排熱した。

図中に今回試作した光スイッチの構成とパッケージ分割の対応を示した。波長多重パッケージをFig. 6 (a)に、EDFAパッケージをFig. 6 (b)に、最も高密度の光実装を必要とする波長多重／空間多重光セレクトパッケージをFig. 6 (c)に示した。波長／空間光セレクトパッケージは、前面に小型SOAGモジュール32個をアレイ状（16個アレイを2列）に実装し⁹⁾、これらを細線光ファイバで接続している。また、裏面にはSOAGを制御する光スイッチ制御回路、SOAG駆動回路を実装している。

今回試作した各パッケージの大きさから見積もると、2.56Tbpsスループット光スイッチ全体で約9架（36ユニット）になる。これは単純な空間型光スイッチと比較して、体積比1/8であり、将来的に光高密度実装技術が確立すれば、超Tb/s級光スイッチを1架で構成できる技術へ展開できるものと期待する。

3.3 開発した超大容量光スイッチの評価

次に試作機特性評価を、各経路10Gbpsにおける符号誤り率特性、経路間のスイッチ切り替え時間等で評価した。光送信器光源には、1546.1nm(λ_0)から1558.2nm(λ_{15})までの0.8nm間隔16個のDFB-LDを用い、これらの光波長信号を波長多重した後、光強度変調器を用いて一括変調を行い、擬似的な波長多重信号源とした。変調信号はパルスパタンジェネレータ（PPG）から出力される10Gbps、NRZ、 $2^{23}-1$ の疑似ランダムパタンである。変調した光信号は、今回開発したEDFAパッケージで波長一括増幅された後、16分岐光カップラを2段縦続接続した疑似256分岐器へ導入される。後段の16分岐出力は、それぞれ長さの異なる光ファイバを用いて信号位相相関関係を除去した後に今回試作した256:1波長多重／空間多重光セレクト（SEL PKG）に入力した。また、受信器は、EDFA光前置増幅器（前述の光送信器光源のすべてを透過する半値幅20nmの光バンドパスフィルタを内蔵）とPIN光受信器で構成した。

まず、10Gb/sにおける符号誤り率特性（BER）測定を

通じて、256×256光スイッチのクロストークによる信号対雑音比および波形劣化の評価を行った。すべての波長に対してBER=10⁻¹¹以下の安定動作を確認できた。この結果から、光スイッチ通過した信号に大きな劣化がないことが確認できた。

次に、SEL PKGの切り替え動作特性の評価を行い、すべてのSOAGが1 nsec以下で切り替え動作可能であることを確認した。また、全SOAGの切り替えスキュー測定した結果、切り替えスキューを1 nsec以下に抑圧できることも確認した。この結果から、光スイッチの切り替えガードタイムは5 nsecで十分であることがわかり、例えば10GbpsのATMセルを切り替える応用を考えた場合にも、スイッチングのために無効となる帯域は10%以下に抑圧できることが示された。

4. まとめ、今後の期待

将来の大容量通信ネットワークの実現に不可欠な超大容量スイッチ技術と、その実現方法として我々が提案している波長多重／空間多重光スイッチ技術について述べた。また、実際に提案している光スイッチの部分試作を行い、良好な特性が得られたことも示した。提案した波長多重／空間多重スイッチ技術を用いることで、光スイッチ実装をかなり簡易化したものの、現状の光モジュール化技術、光実装技術では、実装規模がかなり大きいこと、接続する配線技術も複雑となることがわかっている。

今後、キーコンポーネントである半導体アンプゲート素子およびその他の機能素子との集積化や、光コンポーネント間を接続する光ファイバ配線のモールド化等、光モジュール化技術、光素子集積化技術、光配線技術が発展し、超大容量光スイッチを小規模に実装できる技術開発展開を期待したい。

素子の集積化に関して考えると、すべての機能素子を集積するべきではないと思う。電気実装のアナログから考えれば、ICと配線ボードというように、機能素子の集積し

た電気ICを配線で接続する技術が使われている。光技術では、いまだ光IC技術が立ち上がっていない状況であるから、かなり単純な光IC（例えばアレイデバイス）から立ち上げ、将来的にパッシブデバイスとの集積化（例えば波長ルータとの集積化）へと展開するのが望ましいと考える。最終的な光IC集積度ターゲットに関しては、光デバイスの温度特性、信頼性、歩留まり等と大いに関係しており、これらの観点から光デバイス専門家間でのご討論を期待したい。

また、でき上がった光デバイスを接続する技術に関して言えば、現状では光デバイスの性能を十分に発揮することに特化した技術展開がなされている。しかしながら将来的には、特に接続簡便性、低損失性、製造容易性等様々な要求項目がある。特性のみから考えれば、現状、単純に光ファイバ接続するのが最も優れている。ぜひこれを打破する技術展開を、いろいろな観点に精通した実装技術の専門家の方々にお願いしたい。

これらの技術展開を通じて、現状電気技術で行われているかなり困難なことを、光技術で簡単に置き換えられる技術に確立し、最終的には光産業全体が大きく発展して行くことを期待する。

(1999.6.7-受理 1999.7.16-再受理)

文 献

- 1) Y.Yano et al.: "2.6 Terabit/s WDM Transmission Experiments using Optical Duobinary Coding", ECOC'96, post-deadline paper, ThB3.1, 1996
- 2) S.Araki et al.: "A 2.56Tb/s Throughput Packet/Cell-Based Optical Switch-Fabric Demonstrator", ECOC'98, post-deadline paper, pp.127-129, 1998
- 3) 高橋成五, 他: "2.56Tbpsまで拡張可能な超大容量光パケットスイッチ", 信学技報, PS98-60, pp.31-35, 1998-12

- 4) 堂前 巧, 他: "大規模光スイッチ用小型SOAゲートモジュール", 信学会1998年ソサイエティ大会, C-3-101, 1998

用語解説

完全非閉塞: スイッチの出力側ポートが空いている場合に、いかなる場合においてもこの空き出力ポートへの経路が存在するスイッチの特性。

マルチキャスト: 入力された信号を、複数の出力ポートに出力する機能。

グルーミング: つなぎ先、あるいはサービスクラス等で種別して束ねる機能。

ATMスイッチ: データサービス等のマルチメディアサービスを行うために、セルと呼ばれる固定長のパケット単位でスイッチする装置。

波長ルータ: 入力された波長多重信号を、波長ごとに異なる出力ポートへ波長分離して出力する素子。また異なる入力ポートから入力された波長多重信号を入力ポートに依存して異なる出力ポートに出力する機能も併せ持つ光素子。

逸見 直也 (へんみ なおや)
昭和36年生まれ。昭和58年、東京大学工学部電気電子工学科卒業。現在、日本電気株式会社C&Cメディア研究所において、光通信および光スイッチング技術応用に従事。

高橋 成五 (たかはし せいご)
昭和41年生まれ。平成4年、東京都立大学大学院修士課程(物理)修了。現在、日本電気株式会社C&Cメディア研究所において、光交換方式、光交換装置および光コンポーネントの研究開発に従事。