

# LCOS を用いたグリッドレス波長選択スイッチ技術

桜井 康 樹

## Gridless Wavelength Selective Switch Based on LCOS Technology

Yasuki SAKURAI

To meet ever-increasing demand for network capacity, both the spectral efficiency and symbol rate carried by a single channel have been increasing dramatically. As a promising candidate, elastic optical path networks have been proposed as a spectrally efficient networking technology, which effectively supports per-channel variable traffic demands. The elastic optical networks allow us to deal with the mix of various traffics with arbitrarily variable symbol rates and modulation formats, which are not only 10 Gbps legacy channels but also core traffic channels over 400 Gbps. In such networks, bandwidth and frequency variable gridless wavelength selective switches play an important role. In this paper, we summarize recent network revolution due to elastic optical path networks and also report the performance of gridless wavelength selective switches based on LCOS technology.

**Key words:** wavelength selective switch (WSS), liquid crystal on silicon (LCOS), reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM), gridless, diffractive optical element (DOE)

昨今の多機能携帯端末の爆発的普及に代表されるように、データトラフィック需要は増加の一途をたどっており、ネットワークの伝送容量拡大と消費電力の低減が急務となっている。それに伴い光ネットワークも進展を続けており、QAM (quadrature amplitude modulation), OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 等のあらゆる多重化技術を駆使し大容量化が図られ、また省エネルギーを目的に電気領域でなく光領域で信号経路の切り替えを行う光波長ルーティング技術が光ノードの標準として採用されている。最近、限られた光周波数資源の効率的利用によるさらなる大容量化を目指したエラスティック光ネットワークとよばれる新しい概念が提唱されている<sup>1,2)</sup>。これは、ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) で定められた一定間隔の周波数グリッド上に WDM (wavelength division multiplexing) 信号を載せる従来の方式に代えて、任意の周波数上に任意の間隔で自在に WDM 信号を配置する、より柔軟性の高い伝送形態である。これにより、各 WDM 信号に適した必要最小限の帯域幅と無駄のない間隔の割り当

てが可能となり、周波数資源の有効利用による大容量化が実現される。この次世代光ネットワークでは、異なる占有帯域の信号が不規則な周波数間隔で光ファイバー内に混在する状態が想定されるが、光ノードには信号いかんによらずルーティング制限を与えない能力が求められる。筆者らは液晶ディスプレイで培われた LCOS (liquid crystal on silicon) 技術に着目し、エラスティック光ネットワークの ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer) ノードでの使用を想定した波長ルーティングデバイスの開発を行ってきた。本稿では、LCOS を用いた帯域幅可変の波長選択スイッチ (WSS: wavelength selective switch) について、その動作原理と性能、およびネットワークに与えるインパクトについて解説する。

### 1. ROADM/WXC ノード

ROADM は光通信ネットワーク網を効率よく柔軟に運用するためのパス管理技術であり、リング、メッシュ等のネットワークトポロジーに広く普及している。図 1 に ROADM/WXC ノードからなる光メッシュネットワークの

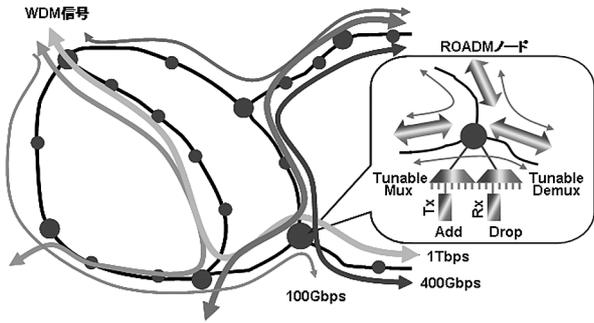


図1 ROADM ノードからなる光メッシュネットワークの概念図。

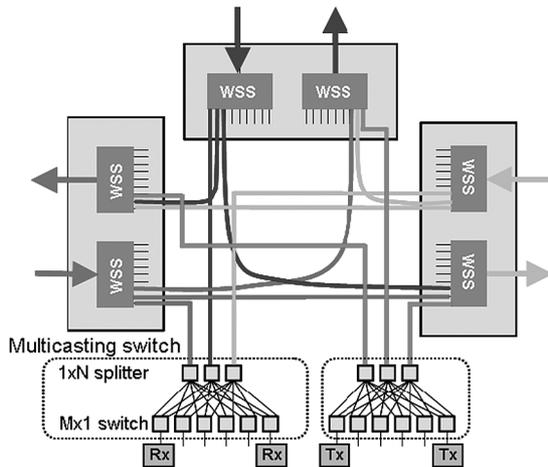
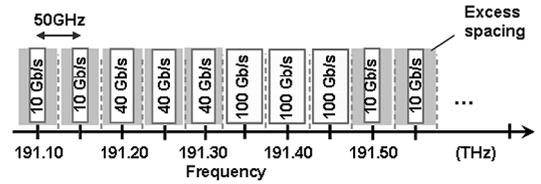


図2 WSS を用いた 3 方路の WXC ノード構成例。

概念図を示す。複数の ROADM/WXC ノードが光ファイバーでメッシュ状に繋がれた構成であり、各ノードは WDM 信号を分岐/挿入する add/drop 機能、および各方路から入力される WDM 信号を任意の方路に経路を切り替えるルーティング機能を備える。遠隔操作で電気信号に変換することなく経路を切り替えることができるため、従来の O/E (optical/ electrical), E/O 変換を伴う電気ルーターを不要とすることで大幅な省エネルギー効果が期待でき、また人手による光ファイバー接続作業を不要とすることで伝送効率を損ねることなくパス管理の柔軟性を大幅に向上させることができる。図2に WSS を用いた 3 方路の WXC ノード構成例を示す。各方路の入出力部に WSS 2 機の計 6 機を配置し、WSS の mux/demux 機能を利用して WDM 信号のルーティングを行う。add/drop 機能には、扱う WDM 信号に波長制限を加えないために送信機 (Tx)/ 受信機 (Rx) の mux/ demux 部に光スプリッターと光スイッチを組み合わせたマルチキャストスイッチを用い、各 Tx/Rx において同一波長の使用を許容する構成としている<sup>3)</sup>。一方、伝送容量の観点では周波数利用効率を高める技術の研究/開発が進み、多値変調技術 QAM や OFDM 技

(a) Fixed Grid (50GHz spacing)



(b) Gridless 400Gbps~

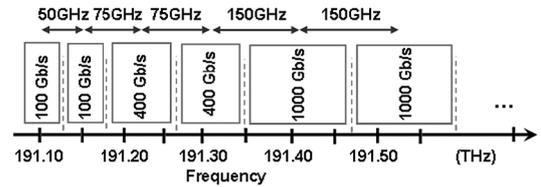


図3 グリッドレスによる光周波数資源の有効利用。

術を駆使した 400 Gbps, 1 Tbps を超えるシンボルレート  
の伝送実験例も報告されている<sup>4,5)</sup>。このような高速光信号は占有する周波数帯域が広い  
ため、10 Gbps, 40 Gbps に代表される従来の光信号と同一ネットワーク上で効率よく共存させるには、ROADM/WXC ノードに通過帯域の周波数、および帯域幅を動的に制御できるグリッドレス機能を備えた WSS が必要不可欠となる。例えば、ITU-T で定められた一定間隔の周波数グリッド上に各信号を載せる従来の方式においてシンボルレートの異なる信号を混在させる場合、ROADM/WXC ノードが扱う WDM 信号のうち最も周波数占有帯域が広い光信号が周波数間隔を決めることになる。したがって、低速信号に対しては必要以上の帯域を割り当てることになり、無駄な周波数帯が発生する。一方、グリッドレス機能を備えた WSS を用いる場合、ルーティングする光信号に応じて周波数、帯域幅を任意に設定することができるため、各 WDM 信号に対し必要最小限の周波数帯域を適切な間隔で割り当てることができ、周波数資源の有効利用による伝送容量拡大が期待できる (図3)。

## 2. 波長選択スイッチ WSS

ROADM/WXC ノードに用いられる WSS は  $N$  入力 1 出力 ( $N \times 1$ )、もしくは 1 入力  $N$  出力 ( $1 \times N$ ) の mux/demux 機能を有しており、入力ポートからの各 WDM 信号を任意の出力ポートに出力 (demux)、もしくはその逆の経路で入出力 (mux) できる双方向モジュールである。また、各 WDM 信号に対し任意の挿入損失を与える、もしくは光を遮断する光減衰機能を具備しているのが一般的であり、各信号のパワーレベルをモニターする光チャンネルモニターと併せてノードからの出力信号レベルの管理に利用される。WSS の基本的な光学構成例を図4に示す。入出力ファイバーアレイ、入力 WDM 信号光を信号ごとに空間的に分離

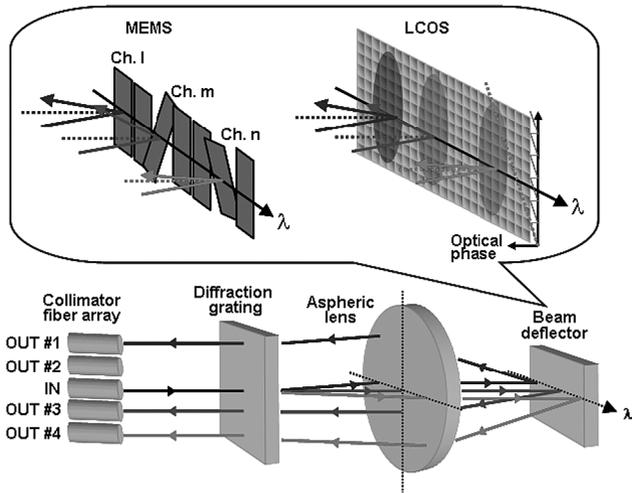


図4 WSSの基本光学構成例。

する分光素子，像側テレセントリックを構成する集光レンズ，および各WDM信号を任意の出力ポートに振り分けるアレイ型光ビーム偏向素子からなる．光ビーム偏向素子にはLC (liquid crystal), LCOS, MEMS (micro-electro-mechanical systems), DMD (digital mirror device), あるいはその複合素子が使われる<sup>6)</sup>．このうち，MEMS, DMDはその原理上偏向特性に偏光依存性はないが，LCとLCOSでは液晶のもつ屈折率異方特性により強い偏光依存性を示すため，偏向素子への入力偏波を制御する偏波制御素子が必要となる．また，一般的にMEMS, LCでは各WDM信号光に1つの制御ミラー，制御画素が対応づけられるが，数百万画素の二次元マトリックス構造をもつDMD, LCOSでは複数の制御画素を割り当てることができるため，グリッドレス動作が可能であり，周波数スペクトル応答をハードウェア構成に制限されることなくファームウェア上で自由自在に再構築することが可能となる．DMDのスイッチング速度はマイクロ秒オーダーであり高速なパス切り替えが可能である利点があるが，そのミラー角度はon/offのデジタル制御が基本であるため，WSSに応用する場合，ポート数が制限されることになる．一方，LCOSの応答速度は数～数十msとDMDに比べ低速であるものの，偏向角度はアナログ的に可変制御できるため，WSSの多ポート化に有利な偏向素子である．

### 3. 光ビーム偏向素子 LCOS

LCOSの空間的な位相変調特性を回折光学素子 (DOE: diffractive optical element) として応用すると，数度程度の比較的大きな振れ角をもつ光ビーム偏向素子として動作させることができる．この場合，LCOSの各画素域内は同一位相となるため，位相プロファイルが階段状のマルチ

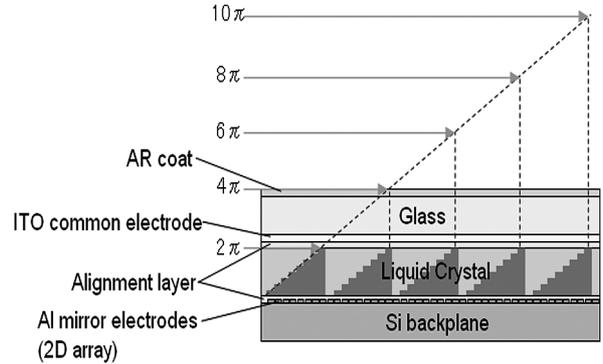


図5 LCOSを用いた光ビーム偏向の概念図。

レベル化DOEとして機能する．図5にLCOSを用いた光ビーム偏向の概念図を示す．LCOSは，液晶材料をITO (indium tin oxide) からなる共通透明電極とCMOS (complementary metal oxide semiconductor) を形成するSi基板上の画素電極で挟み込んだ構造である．各画素電極に独立に任意の電圧を印加することで，空間的な位相プロファイルを形成し，マルチレベル化DOEを実現する．このとき，画素電極は反射ミラーとしての機能も兼ねる．マルチレベル化DOEでは，位相の連続性を保つため最大位相シフト量は $2\pi$  rad付近に設定されるのが一般的である．LCOSの画素サイズ $d$ ，マルチレベル数 $q$  (位相 $2\pi$  radに包含される仮定の画素数，小数点設定可)，入射光波長 $\lambda$ ，入射角度 $\theta_{in}$ とすると，回折角度 $\theta_d$ と回折効率 $\eta$ は以下の近似式で表現できる．

$$\theta_{in} + \theta_d = m \cdot \lambda / \Lambda \quad (1)$$

$$\eta = (\sin(\pi/q) / (\pi/q))^2 \quad (2)$$

$$\Lambda = d \cdot q \quad (3)$$

ここで， $m$ は回折次数， $\Lambda$ はDOEの位相周期を表す．

マルチレベル数，つまりDOEの位相周期を可変することで，偏向角をアナログ的に制御可能である．LCOSを用いたWSSでは，この原理をポートスイッチング動作に応用する．マルチレベル数を小さく設定することで偏向角を大きくとることができるため，WSSの多ポート化に有効である．この場合，式(2)からわかるように，回折効率の低下がポート数の制限要因となる．WSSにはAR (anti-reflective) 膜や液晶層厚等近赤外光に特化したLCOS構造を用いる必要があるため，可視光を対象とするディスプレイ用LCOSをそのまま転用することは難しい．われわれが光通信デバイス用に開発したLCOSの解像度は $1920 \times 1080$ 画素のHDTV (high definition television) 規格，交流駆動電圧出力 $0 \sim 12$  Vp-p，階調度は12 bitである．画素電極幅とピッチはそれぞれ $8.0 \mu\text{m}$ ， $8.5 \mu\text{m}$ である．また，LCOSを光通信デバイスに応用する場合，フリッカー雑音

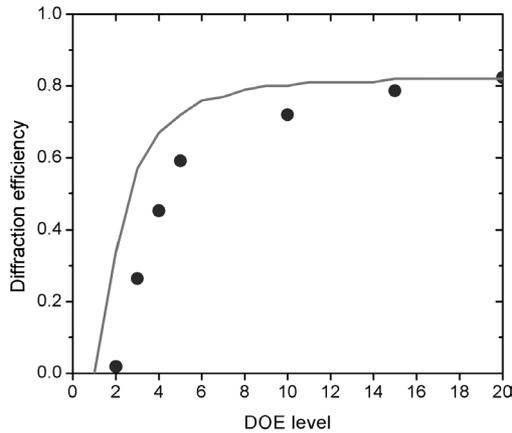


図6 +1次回折光の回折効率. 実線: 計算値, ●: 測定値.

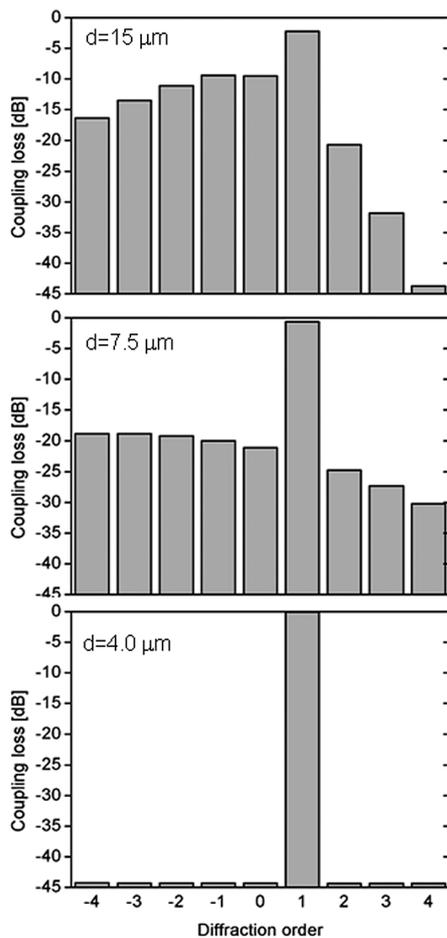


図7 液晶層厚と高次回折光強度の計算例.

とよばれる出力光パワー変動が問題となる<sup>3)</sup>が、位相パターンの描画エリアを必要最小限の光ビーム領域に限定することでフレームレートを実効的に高速化する駆動方法を採用し、光パワー変動を光通信デバイスの動作温度範囲内(-5~65°C)で0.05 dB以下に抑えている。このLCOSをマルチレベル化DOEとして動作させた場合の+1次回折光の回折効率の計算値と実測値を図6にそれぞれ示す。回



図8 グリッドレス1×4 WSSの外観.

折効率、回折角度ともに、計算値とほぼ一致する結果が得られている。このマルチレベル化DOEはその原理上、所望の回折次数以外に高次回折光が少なからず発生するが、WSSへの応用を考えた場合、この高次回折光がいずれかの出力ポートに結合すると光クロストークを発生させるため、高次回折光強度は可能な限り小さいことが望ましい。DOEの回折効率は $\Lambda \gg \lambda$ の関係が成り立ち、かつグレーティング層が十分薄いとみなせる場合、高次回折光を含めた回折効率は式(4)で表現できる<sup>7)</sup>。

$$\eta = \left| \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \exp(j\Phi(x)) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot x}{\Lambda}\right) dx \right|^2 \quad (4)$$

ここで $\Phi(x)$ は位相シフト関数であり、ブレード回折格子の場合は線形、マルチレベル化DOEの場合はマルチレベル数で量子化された階段状のステップ関数を定義する。液晶では異なる電圧を印加する画素境界でフリッジ効果とよばれる液晶分子のダイレクタの乱れが発生することが知られており、このフリッジ効果の程度は液晶層厚や液晶材料に強く依存する<sup>8)</sup>。マルチレベル化DOEの場合、この効果により位相シフト量 $2\pi$  rad付近の不連続部で理想の位相シフト関数からのずれが顕著に発生し、これが高次回折光を増強する原因となる。図7に液晶層厚と高次回折光強度の計算例を示す。液晶層厚を低減する、つまり高い複屈折液晶材料を使うことが、高次回折光の抑制には有効であり、WSSの低クロストーク化には望ましい構造である。

#### 4. グリッドレスWSSの光学性能

開発したグリッドレス1×4 WSS (1入力4出力)の外観を図8に示す。Cバンド帯域内での挿入損失、ポート間光クロストーク、PDL (polarization dependent loss) 仕様値はそれぞれ、<6.5 dB, >35 dB, <0.5 dB (光減衰量0 dB時)である。デバイスサイズは165×110×20 mmであり、伝送装置においてWSSを実装するラインカードが1Uサイズに格納できるよう薄型設計に配慮した。液晶を用い

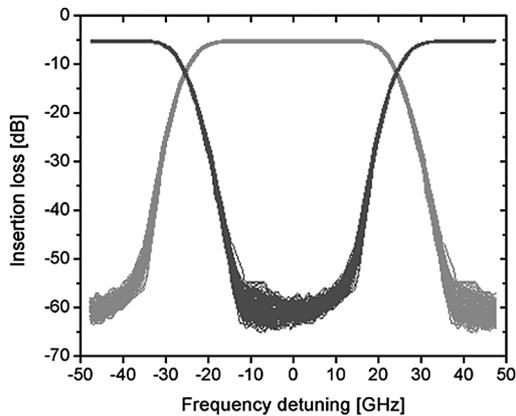


図9 WSSの透過スペクトル.

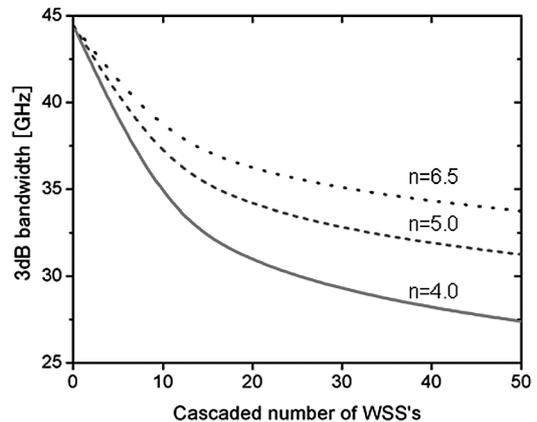


図10 WSS多段接続時の3dB透過帯域幅.

た光通信デバイスの場合、複屈折率や粘度等液晶の物性値の温度依存性により光学応答は強い温度依存性を示すため、TEC (thermoelectric cooler) を用いてその依存性を補償する構造とするのが一般的であるが、TECの低い冷却能力によりデバイス全体の消費電力は30~50W程度と高くなる傾向にある。本デバイスでは液晶材料とLCOS駆動方法を最適化し、TECフリーで動作させることで消費電力を10W以下に抑えている<sup>9)</sup>。本WSSのCバンド96チャンネルの透過スペクトル例を図9に示す。周波数間隔50GHz設定における0.5dB、3.0dB透過帯域幅はそれぞれ、>45GHz、>38GHzである。次世代の光通信形態として有力視されているエラスティック光ネットワークやスーパーチャンネル伝送方式のように極限まで各WDM信号光を周波数軸上に詰め込むネットワークにおいては、WSSの透過スペクトル形状が伝送性能に大きな影響を与え、特にWSSが多段接続される実運用下では、その透過帯域狭窄効果が伝送距離を制限する原因となる<sup>10)</sup>。WSSの伝達関数は式(5)で示すスーパーガウス関数で近似できることが知られている。

$$IL[\text{dB}] = 10 \cdot \log[\exp(-\ln(2) \cdot (2 \cdot \Delta\nu / BW_3)^{2n})] \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\nu$ 、 $BW_3$ 、 $n$ はそれぞれ、透過スペクトル中心からの周波数オフセット、3dB透過帯域幅、ガウシアン次数である。開発したグリッドレスWSSの実力値(3dB透過帯域幅 $\mu$ : 45.8GHz /  $\sigma$ : 0.43GHz; 中心周波数ズレ $\mu$ : 0.09GHz /  $\sigma$ : 0.25GHz)を仮定し、WSS多段接続後の3dB透過帯域幅をモンテカルロ法により計算した結果を図10に示す。次数の高いより急峻な透過スペクトル形状では、透過帯域幅の狭窄効果の影響を抑制することができ、多段接続には有利なスペクトル形状であるといえる。開発したWSSのフィルター波形は $n=5.0$ に相当するが、この場合、例えば20段縦続接続後の3dB透過帯域幅は99.7%(3 $\sigma$ )水準で34GHz以上確保できると予測される。図11

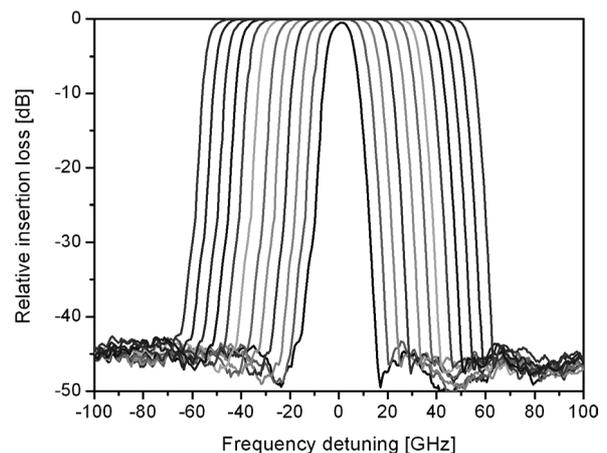


図11 WSSのグリッドレス動作.

にグリッドレス動作させたときのフィルタースペクトルを示す。顕著な挿入損失の劣化や波形の歪みなく、フラットトップなフィルター波形を保持しながら透過帯域幅を制御できている。

次世代の大容量、かつ柔軟なネットワーク形態として注目されるエラスティック光ネットワークの概要、およびその光ノードを構成するLCOSを用いたグリッドレス波長選択スイッチの動作原理と性能について紹介した。最近では、運用中のネットワーク利用効率をサービスを中断することなく最適化する光デフラグメンテーション技術が提案され、動作実証が行われている<sup>11)</sup>。これは、ネットワーク内の断続的に存在する光周波数の未使用領域を連続的な周波数群に集約することで使用可能な周波数帯域を確保するものであり、運用中の光パスに影響を与えない動的なグリッドレス動作がWSSに求められることになる。これらの大容量化に向けたネットワークの進展に伴い、本稿で紹介したLCOSを用いたグリッドレス波長選択スイッチの重要性がますます高まっていくものと考えられる。

## 文 献

- 1) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, K. Yoneganaga, A. Takada, O. Ishida and S. Matsuoka: "Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s," *Proc. of 34th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper Th.3.F.6 (2008).
- 2) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone and S. Matsuoka: "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Commun. Mag.*, **47** (2009) 66-73.
- 3) P. Colbourne and B. Collings: "ROADM switching technologies," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTuD1 (2011).
- 4) T. J. Xia, G. A. Wellbrock, Y. Huang, E. Ip, M. Huang, Y. Shao, T. Wang, Y. Aono, T. Tajima, S. Murakami and M. Cvijetic: "Field experiment with mixed line-rate transmission (112-Gb/s, 450-Gb/s, and 1.15-Tb/s) over 3,560 km of installed fiber using filterless coherent receiver and EDFAs only," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper PDPA3 (2012).
- 5) Y. Huang, E. Ip, P. N. Ji, Y. Shao, T. Wang, Y. Aono, Y. Yano and T. Tajima: "Terabit/s optical superchannel with flexible modulation format for dynamic distance/route transmission," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OM3H.4 (2012).
- 6) P. Wall, P. Colbourne, C. Reimer and S. McLaughlin: "WSS switching engine technologies," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OWC1 (2008).
- 7) E. G. Loewen and E. Popov: *Diffraction Gratings and Applications* (CRC Press, New York, 1997) pp. 149-190.
- 8) J. Kelly: "Application of liquid crystal technology to telecommunication devices," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper NThE1 (2007).
- 9) 川杉昌弘, 桜井康樹, 堀田雄二, 竹内克佳, 高牟禮弘和, 音羽亮平, 上原 昇: "クーラーレス LCOS 型波長選択スイッチ", 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-20 (2012).
- 10) F. Heismann: "System requirements for WSS filter shape in cascaded ROADM networks," *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OThR1 (2010).
- 11) K. Sone, X. Wang, S. Oda, G. Nakagawa, Y. Aoki, I. Kim, P. Palacharla, T. Hoshida, M. Sekiya and J. C. Rasmussen: "First demonstration of hitless spectrum defragmentation using real-time coherent receivers in flexible grid optical networks," *Proc. of 38th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper Th.3.D.1 (2012).

(2012 年 12 月 6 日受理)