

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers



津田 裕之 (Hiroyuki TSUDA, Ph. D.)
慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 教授
(Professor, Keio University, Faculty of Science and Technology,
Department of Electronics and Electrical Engineering)
電子情報通信学会、応用物理学会、レーザー学会、IEEE、Optica 他
受賞：電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ招待論文賞 (2020
年)、IEICE ELEX Best Paper Award 賞 (2018 年) 他
研究専門分野：光エレクトロニクス、光通信

あらまし

周回型アレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) *1 を用いて、波長ルーティングによるフルメッシュネットワークを構成することができる [1]。本研究では、未使用の波長帯、T-band [2, 3] (波長 1.000 ~ 1.260 μm) を利用する多段構成のアレイ導波路回折格子ルータ (AWGR: AWG Router) を構成した [4]。さらに、空間光スイッチと組み合わせることで収容可能なユーザ数を増大させ、データセンタネットワークへの適用を検討した。AWGR と空間光スイッチによる伝送評価系を構築し、T-band で動作する量子ドット波長可変レーザと量子ドット半導体光増幅器を利用し、FPGA 間で 10 Gbit/s 光信号のエラーフリー伝送を実現した。

1. 研究の背景と目的

多様なインターネットサービスに対応するため通信トラフィックは増大を続けている。特に、サービスを支える大規模データセンタ内、あるいは、データセンタ間にはその需要に応える大容量の光通信システムが必須である。従来、長距離光伝送システムの大容量化には、多値変調技術とコヒーレント伝送技術の活用による周波数利用効率の向上が行われてきた。一方、データセンタ用の短距離伝送システムの大容量化には、光ファイバの広大な未使用波長帯を利用することも可能

である。

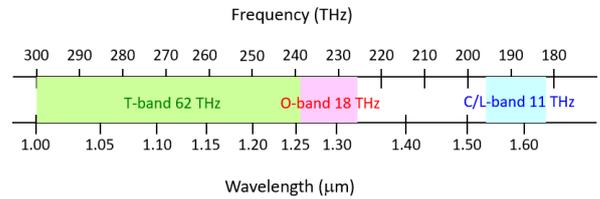


図 1 光通信で利用する波長帯。従来、長距離に C/L-band、短距離に O-band が利用されてきた。本研究では、新規に T-band を活用した。

図 1 に光ファイバ通信に利用可能な波長帯を示す。長距離光伝送システムでは、光ファイバの伝送損失が最小の 0.2 dB/km となり、エルビウム添加光ファイバ増幅器が動作する、C-band (波長 1.530 ~ 1.565 μm) と隣接する L-band (波長 1.565 ~ 1.625 μm) が利用されている。また、短距離光伝送システムでは、標準光ファイバの波長分散がほぼ零となる O-band (波長 1.260 ~ 1.360 μm) が主に利用されてきた。T-band (波長 1.000 ~ 1.260 μm) おいて、光ファイバの伝送損失は 0.5 ~ 1.2 dB/km、波長分散は -5 ~ -40 ps/nm/km であり、データセンタで想定される数 km の伝送距離では許容できる値である。T-band で良好な特性を持つ量子ドットレーザ [5] を光源として利用し、T-band を利用する光伝送システムを構築することが可能である。例えば、100 GHz のチャンネル間隔で 10 Gbit/s の伝送を行えば、IMDD (Intensity Modulation Direct Detection) 方式を利用して、6 Tbit/s 以上の伝送容量を得ることができる。また、標準単一モード光ファイバのカットオフ波長は、1.2 μm 程度であるので、T-band の短波長側では光ファイバ中の伝搬光がマルチモードとなり、モード分散が生じて信号が劣化する。そのため、カットオフ波長を 1 μm より短波長とすることが必要である。

本研究では、T-band で動作する石英光導波路を用いた AWG を多段に接続して大規模な AWG ルータを構成した。また、AWGR と空間光スイッチを用いたデータセンタ用ネットワークを提案し、伝送実験による動作デモンストレーションを行った。

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers

2. アレイ導波路回折格子ルータ (AWGR) の構成

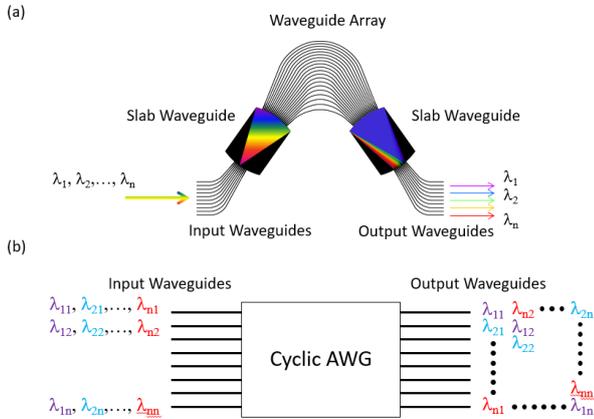


図 2 (a) アレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) の構成。 (b) 周回型 AWG の動作。

図 2(a)に AWG の構成を示す。AWG は、入力導波路、スラブ導波路、アレイ導波路、出力導波路から構成される。入射光は、第 1 のスラブ導波路で広がり、アレイ導波路に入射する。アレイ導波路中で隣接する導波路は ΔL だけ長さが異なるので回折格子として動作する。回折次数は ΔL によって決まるが、回折次数を数十の値にして高分解能な分光特性を容易に得ることができる。アレイ導波路から出射された光は、スラブ導波路の持つレンズ機能によって、波長毎に異なる出力導波路に結合する。図 2(b)に周回性を持たせた AWG の動作を示す。入射波長あるいは入力導波路を変えるとそれによって出力導波路が変化し、周回する。この性質を利用すると各ユーザに異なる波長を割り当てることによって、送信側の波長を変えて接続先を選択する $N \times N$ のフルメッシュネットワークが構成される。

AWG の入出力導波路数は、基板寸法、入出力ファイバ本数、また、透過波長ピークの周波数グリッドからのずれによって制限され、 64×64 程度が最大となる。収容可能なユーザ数を増やすため、図 3 に示すように、 $1 \times M$ サブバンド用 AWG と $K \times K$ 高分解能 AWG を多段接続し、 $KM \times KM$ の大規模 AWGR を構成することとした。図 4 に波長割り当てを示す。 $M = 23, K = 47$

として、サブバンドの波長幅を 15.6 nm、チャンネル間隔を 0.2 nm とした。即ち、 1081×1081 の大規模 AWGR が構成される。ピーク波長ずれを低減するために、周波数グリッドではなく、波長グリッドを利用している。また、AWGR を構成する AWG の設計値を表 1 に示す。約 40% の波長領域をガードバンドとしている。ガードバンドを減らして周波数利用効率を高めるためには、サブバンド用 AWG の透過帯域形状の改善が必要である。

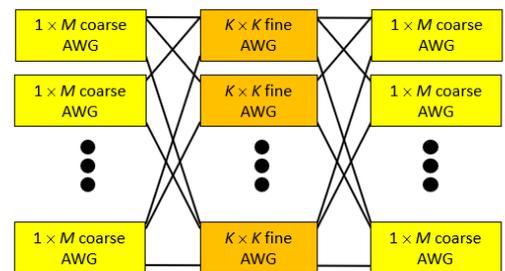


図 3 多段構成の大規模回折格子ルータ (AWGR: AWG Router)。 $1 \times M$ サブバンド用 AWG と $K \times K$ 高分解能 AWG を多段接続し、 $KM \times KM$ の大規模波長ルータが構成される。

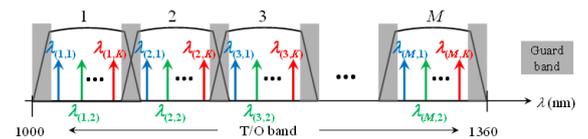


図 4 AWGR における波長割り当て。 $M = 23, K = 47$

AWG を構成する石英光導波路は、T-band で単一モードとなるように、導波路の比屈折率差を 1%、コア径を $4.0 \mu\text{m}$ とした。図 5(a)及び 5(b)に 1×23 サブバンド用 AWG と 47×47 高分解能 AWG の透過特性を示す。サブバンド用 AWG は、ピーク波長損失が 4~6 dB、クロストークが -30 dB 以下、3-dB 透過帯域幅が 11.6 nm であった。透過帯域幅内に高分解能 AWG の 47 ch (9.4 nm) の全透過域を包含する。高分解能 AWG は、ピーク波長損失が 4~7 dB、クロストークが -30 dB 以下、3-dB 透過帯域幅が 0.14 nm であった。10 Gbit/s

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers

強度変調信号がペナルティ無しで透過できる帯域幅である。

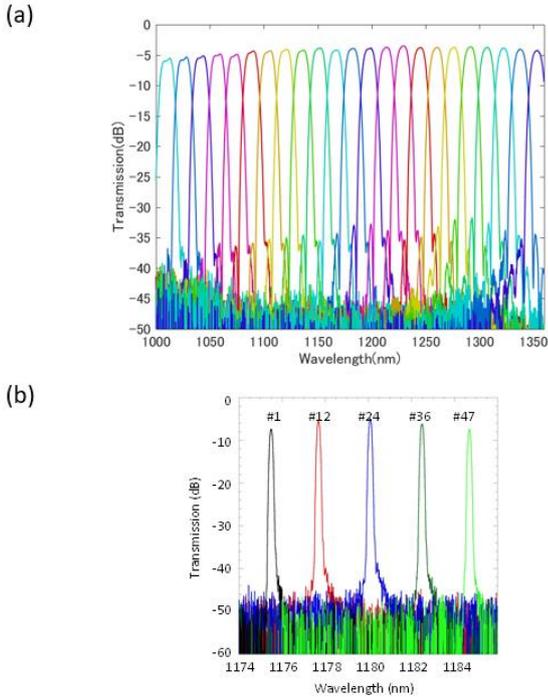


図5 (a) 1×23 サブバンド用 AWG、(b) 47×47 高分解能 AWG の透過スペクトル

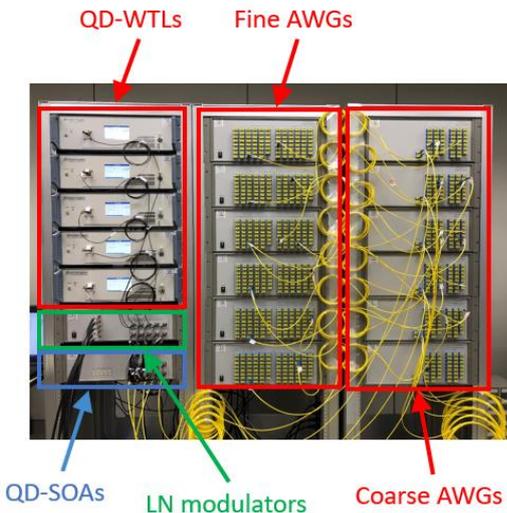


図6 12 台のサブバンド用 AWG (1 筐体に 2 台搭載)、6 台の高分解能 AWG(サブバンド#5, #11, #12, #14, #17, #18)、QD-WTL (Quantum Dot Wavelength Tunable Laser)、QD-SOA (Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier)、LN 変調器により構成された AWGR システム

図6に AWGR システムの写真を示す。送信側の光源として波長可変量子ドット*2 レーザ (QD-WTL: Quantum Dot Wavelength Tunable Laser) を利用し、変調光の増幅のために量子ドット半導体光増幅器 (QD-SOA) を利用した。量子ドットレーザはリッジ構造で単一横モード発振する。標準的なリッジ幅は 3.4 μm、共振器長は 1.6 mm である。量子ドットの構造を変えることによって様々な波長の光源を構成することが可能である。量子ドットレーザは 95°C まで発振可能であり、連続通電で 25°C から 85°C の温度サイクル環境下で 1000 時間以上劣化のない信頼性を有している。また、波長可変とするために外部共振器構造とした。QD-SOA は、10~13 dB の利得、8~12 dB の雑音指数、80 nm 以上の利得帯域を有する。なお、本装置は、NICT 委託研究 (T バンド、O バンドによる大波長空間利用技術の開発) において、パイオニア・マイクロ・テクノロジー (株)、光伸光学工業 (株)、(株) オプトクエストとの共同開発した装置である [6-10]。図7(a)及び7(b)に、サブバンド#5、#17 の 10 Gbit/s 光信号を AWGR を介してルーティングした場合の符号誤り率を示す。この結果から、1 dB 以下のパワペナルティで、エラーフリー伝送が可能であることが示された。

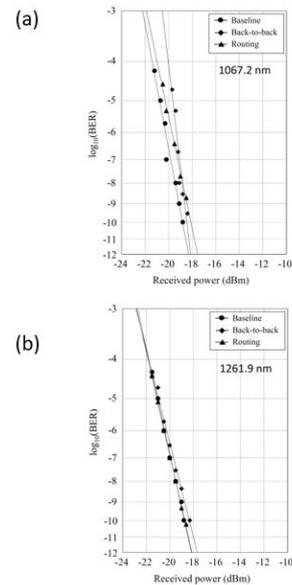


図7 (a) サブバンド#5, (b) サブバンド#17 の 10 Gbit/s 光信号を AWGR を介してルーティングした場合の符号誤り率

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers

3. AWGR のデータセンタネットワークへの適用

データセンタ内のノード数は大規模なデータセンタでは数十万台に及ぶ。そのため、1000 波長を利用しても全てのノードを接続することはできない。ネットワークのユーザ数の増大には、波長ルータと空間スイッチを利用し、多数の波長と空間（光ファイバ）を用いることが解決策である。

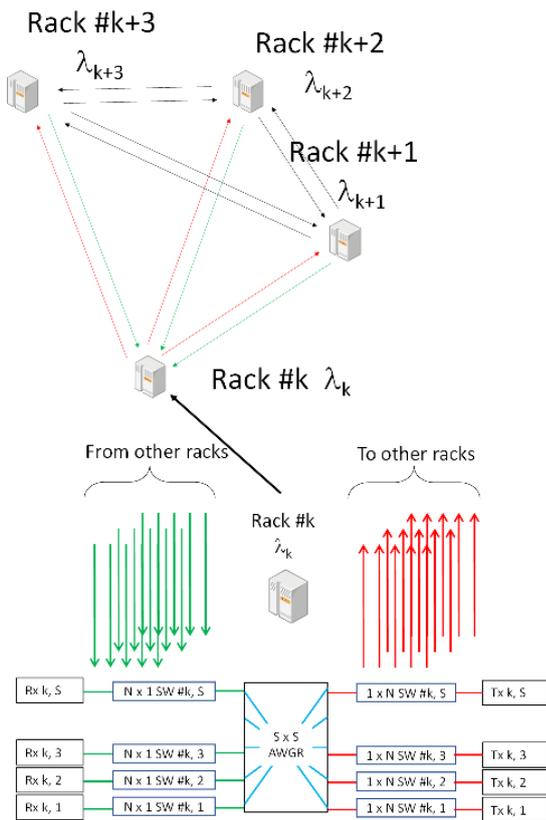


図 8 データセンタを構成するラック内とラック間を AWGR と空間光スイッチで接続するネットワーク

図 8 に AWGR と空間光スイッチによる大規模ネットワーク構成を示す。各ラックは S 台の送受信器を有し、 $S \times S$ AWGR でラック内のノードを結ぶネットワークを構成し、 $1 \times N$ 空間スイッチによって他の $N-1$ 台のラックに接続される。 NS 台のノードが相互に接続される。図 9 に示すように、T-band の AWGR に空間光スイッチを接続して FPGA 間を結ぶネットワークを構成した。FPGA からの 10 Gbit/s 信号を LN 光変調器に入力し、波長 1180.2 nm と波長 1199.1 nm の光信号を生成し、空間光スイッチと T-band AWGR を

介して伝送した。符号誤り率測定結果を図 10(a)及び 10(b)に示す。1-3 dB 程度のペナルティが生じているが、エラーフリー伝送を確認している。ペナルティは、光パワ増幅における光雑音が主因であると考えられる。なお、本実験は、University College London にて、G. Zervas 教授と H. Yuan 博士と共同で行った。

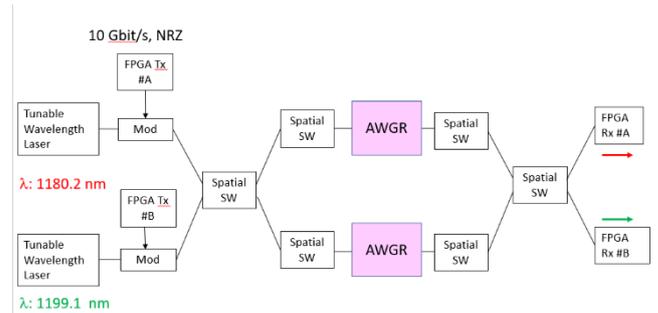


図 9 空間光スイッチと AWGR で構成するネットワークの伝送実験系

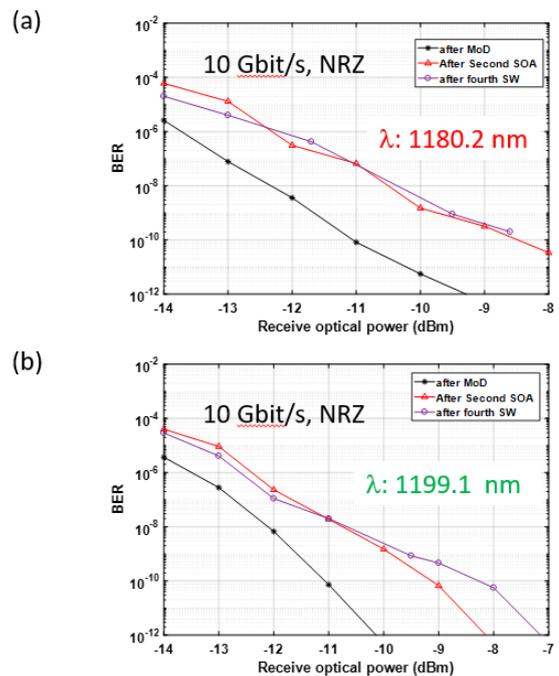


図 10 空間光スイッチと AWGR で構成するネットワークの伝送特性

(a)波長 1180.2 nm、(b) 波長 1199.1 nm

おわりに

従来、光通信システムで未使用の T-band は、62 THz の広大な周波数帯域を有するので、短距離通信に限定

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers

されるものの、強度変調・直接検波などの低コスト変復調方式を用いて、大容量のネットワークを構成することが可能である。本研究では、T-band で動作する、QD-WTL、QD-SOA、AWGR と空間光スイッチによるデータセンタ用ネットワークの一部を構築し、複数の FPGA 間でのエラーフリー伝送を示した。

従来利用されている石英光回路と LN 光変調器を実験に利用したが、将来は、シリコン光回路をベースとした光電融合回路で光送受信器が構成されると考えられる。量子ドットレーザは高温動作可能であり、シリコン基板に集積して長寿命が期待できる。一方、シリコンのバンドギャップが約 $1.1 \mu\text{m}$ であるので、T-band 内の波長 $1.0\sim 1.1 \mu\text{m}$ での動作は難しい。また、光ファイバのカットオフを短波長側にすると、長波長側での曲げ損失が大きくなる課題もある。以上から、短距離のネットワークにおいては、T-band の一部から L-band まで、即ち、波長 $1.1\sim 1.6 \mu\text{m}$ をカバーする超広帯域通信システムが将来の姿となるだろうと考えられる。データセンタネットワークはこの超広帯域通信システムの第 1 の適用領域であり、次いで新規に構築される B5G 用フロント/バックホールネットワークが第 2 の適用領域であると思われる。

用語解説

- *1 AWG は、波長分割多重通信用に開発された光回路で、多数の波長信号の合分波に利用されている。N 入力 N 出力の AWG は、波長を変えることで接続先が切り替わる $N\times N$ のフルメッシュ接続波長ルーティングネットワークを構成する。
- *2 量子ドットは、数 nm から十数 nm の非常に小さい粒子であり、電子や励起子などが閉じ込められる構造であり、離散的なバンド構造を有する。本研究では、GaAs 基板上の InGaAs 層に埋め込まれた InAs 量子ドットを活性層とする外部共振器型波長可変レーザと SOA を作製した。

参考文献

[1] K. Noguchi, Y. Koike, H. Tanobe, K. Harada, M. Matsuoka, "Field trial of full-mesh WDM network (AWG-STAR) in metropolitan/local

area," J. Lightwave Technol., vol.22, no.2, pp. 329-336, 2004.

[2] N. Yamamoto, K. Akahane, T. Umezawa, A. Matsumoto, and T. Kawanishi, "Monolithically integrated quantum dot optical modulator with semiconductor optical amplifier for thousand and original band optical communication," Jpn. J. Appl. Phys., vol.55, no.4S, 04EC16, April 2016.

[3] N. Yamamoto and H. Sotobayashi, "All-band photonic transport system and its device technologies," Proc. SPIE, vol.7235, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems, 72350C, 2009.

[4] N. A. Idris, K. Yoshizawa, Y. Tomomatsu, M. Sudo, T. Hajikano, R. Kubo, G. Zervas, and H. Tsuda, "Full-mesh T- and O-band wavelength router based on arrayed waveguide gratings," Opt. Express, vol. 24, no. 1, pp. 672-686, 2016.

[5] N. Yamamoto, H. Sotobayashi, K. Akahane, and M. Tsuchiya, "Quantum-dot Fabry-Perot laser-diode with a 4-THz injection-seeding bandwidth for $1\text{-}\mu\text{m}$ optical-waveband WDM systems," in Proc. of ISLC 2008, Sorrento, Italy, P20, 2008.

[6] 久保亮吾、吉沢勝美、友松泰則、須藤誠、初鹿野圭、津田裕之、"T/O バンドを用いた 1000 チャンネル級波長ルーティング技術による大容量かつ多様な光ネットワークの実現に向けて" 電子情報通信学会論文誌 C vol. J102-C no. 12 pp. 320-331, 2019.

[7] R. Kubo, H. Tsuda, M. Sudo, T. Hajikano, Y. Tomomatsu, and K. Yoshizawa, "Experimental demonstration of 4K-UHD video transmission using T-band wavelength routing system for passive optical local area networks," Proc. 43rd European Conf. on Optical Communication (ECOC), no.Th.2.B.4, Gothenburg, Sweden, Sept. 2017.

[8] R. Kubo, T. Fujimoto, T. Shobudani, Y. Okuno, M.

大規模アレイ導波路回折格子ルータを用いた T バンドデータセンタネットワーク

T-band datacenter network using large-scale arrayed waveguide grating routers

- Suzuki, H. Tsuda, M. Sudo, T. Hajikano, Y. Tomomatsu, and K. Yoshizawa, "T/O-band wavelength routing system using quantum dot semiconductor devices and 1081-channel AWG router," Proc. Optical Networking and Communication Conf. & Exhibition (OFC), Th3H.4, San Diego, CA, USA, 2018.
- [9] R. Kubo, M. Matsunaga, T. Shobudani, T. Fujimoto, H. Tsuda, M. Sudo, T. Hajikano, Y. Tomomatsu, and K. Yoshizawa, "Demonstration of 10-Gbit/s transmission over G.652 fiber for T-band optical access systems using quantum-dot semiconductor devices," IEICE Electron. Express, vol.15, no.18, 20180810, 2018.
- [10] 津田裕之, "新しい光通信波長帯「T バンド」のための高機能光デバイス" フォトニクスニュース, vol. 5, no. 2, pp.58-62, 2019.

この研究は、平成 29 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 30 年度～令和 2 年度に実施されたものです。