

ネットワーク革新を目指す光電子融合 ハードウェア研究開発の動向

第5世代の移動体通信(5G)の展開やIoT(Internet of Things)、ビッグデータサービスの本格化から、2020年以降もネットワークトラフィックは大きく増加し続けると予想されています。本特集では5年から10年先を見据えた、通信ネットワークの桁違いの大容量化と経済化を実現する先端ハードウェアの研究動向について、特に新しいコンセプト・原理に基づく革新的な光・電子デバイス技術とその融合について紹介します。

むとう しんいちろう※1 たけのうち ひろかず
武藤 伸一郎 / 竹ノ内 弘和

のさか ひでゆき はしもと としかず
野坂 秀之 / 橋本 俊和

みやざき あきひこ※2
宮崎 昭彦

NTT先端集積デバイス研究所

限界のないネットワークのトラフィック増加

世界的かつ急速なスマートフォンの普及によるモバイルトラフィックの増加はとどまるところを知らず、今後5年間で約10倍の増加が予想されています⁽¹⁾。2020年以降の第5世代移動体通信(5G)への取り組みも精力的に進められ、現行性能をはるかに超える1km²当たりで1000倍という大容量化、数10GHz帯のミリ波を用いた大容量コンテンツ伝送も検討されています⁽²⁾。またIoT(Internet of Things)、すなわちモノとモノとの通信も本格的に立ち上がりつつあります。センシング+知識処理+制御のサイクルで、生産・サービス効率向上を目指すインダストリー4.0のような具体例を積み重ね、究極には人・モノ・環境全体のセンシングデータがネットワークに流通し、機械学習も駆使したビッグデータサービスの源となることでしょう。このような膨大なネットワークトラフィックは、仮想化が進む巨大なデータセンターによるクラウド環境で処理されていき

ます。世界のデータセンターのIPトラフィックは2018年までに2013年の3倍になると予想され、その4分の3がデータセンター内トラフィックであるともいわれています。

光と電子の融合：ネットワークを革新するハードウェア技術

フォトニックネットワークは光と電子が融合した巨大なシステムです。サーバやルータなどの電子装置からの

電気的な情報を光信号として送受信する光トランシーバと、情報の行き先を切り替えるノード装置(電気や光によるスイッチ機能)から構成され、それぞれの装置は電子デバイスと光デバイスの組み合わせにより実現されています。光通信ハードウェアにおける光電子融合のイメージを図1に示します。光通信の進化は時分割多重(TDM: Time Division Multiplex)、波長分割多重(WDM: Wavelength Division Mul-

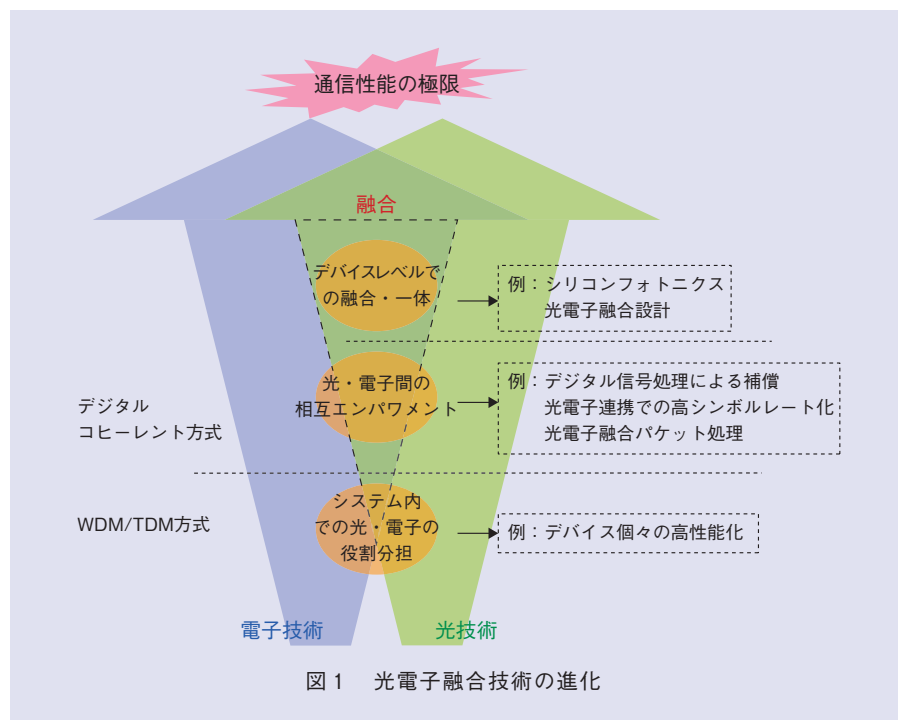


図1 光電子融合技術の進化

※1 現、NTTエレクトロニクス

※2 現、NTTデバイスイノベーションセンター

tplex)などの通信方式の進化に合わせて、光・電子デバイスそれぞれの技術革新により成し遂げられてきました(役割分担)。さらにデジタルコヒーレント通信⁽⁴⁾という画期的な技術により、1波長当り100 Gbit/sで、1000 kmを超える通信が実用化されています。最先端LSIによるデジタル信号処理が、通信路の諸々の揺らぎ・雑音を抑制し、個別の光・電子デバイスの進化だけでは成し得なかった性能を達成しています。今後、このようなデジタル信号処理を含め、光と電子技術の組み合わせによる相乗効果や相互補償が、さらなるネットワーク革新の鍵を握ると考えられます(補償と相乗)。そしてさらなる進化の方向性の1つに「デバイスレベルでの融合」が挙げられます。例えばシリコンフォトニクス技術は、光・電子デバイスを高度に集積することで、高機能化と桁違いの小型化・経済化・低消費電力化を両立させ、通信ハードウェアのパラダイムシフトの源になると期待されています。

本特集では、NTT先端集積デバイス研究所で進めているネットワーク革新を目指したハードウェアの研究開発について紹介します。前半は大容量化の極限を目指す世界最先端の光電子融合ハードウェア技術について紹介します。また、後半では大容量化とともに抜本的な経済化・低消費電力を目指す技術について紹介します。サービス創出の源ともいえるデータセンターネットワーク等、より高い経済性・低電力性が重視されるネットワークの進化を持

続させるためにも重要な技術です。さらにはネットワーク全体の設備投資(CAPEX: Capital Expenditure)、運用コスト(OPEX: Operation Expense)低減に向けた研究動向として、SDN(Software-Defined Networking)時代のネットワーク仮想化に対するハードウェア技術についても紹介します。これら2つの軸での技術のマッピング例を図2に示します。

大容量化の極限を目指すハードウェア技術

■シンボルレートの極限を追求する光電子融合技術

光信号に大容量の情報を載せるには、多値変復調、サブキャリア*1数、

シンボルレート*2の3軸方向に技術を拡張する必要があります。例えば最先端のデジタルコヒーレント通信では、16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)*3と2波のサブキャリア多重により400 Gbit/s級もの超大容量の伝送実験に成功しています⁽⁴⁾。ここで、3軸の拡張に向けたハードウェア研究の中でも、時間軸方向でのシンボ

- *1 サブキャリア：1つの超高速通信チャネルを、複数の波長の光信号(サブキャリア)に分割して多重伝送すること。
- *2 シンボルレート：変調速度。ボーレートともいいます。単位はsps(symbol/second)ですが、通信では“baud”(ボー)とされることが多く、多値変調の場合は1シンボルで多ビットの情報を送ることができるため、情報のビットレートは、シンボルレートと多値度の積で表されます。
- *3 16QAM：16値の直角位相振幅変調。16値=1シンボルで4bit(16値)を送信します。

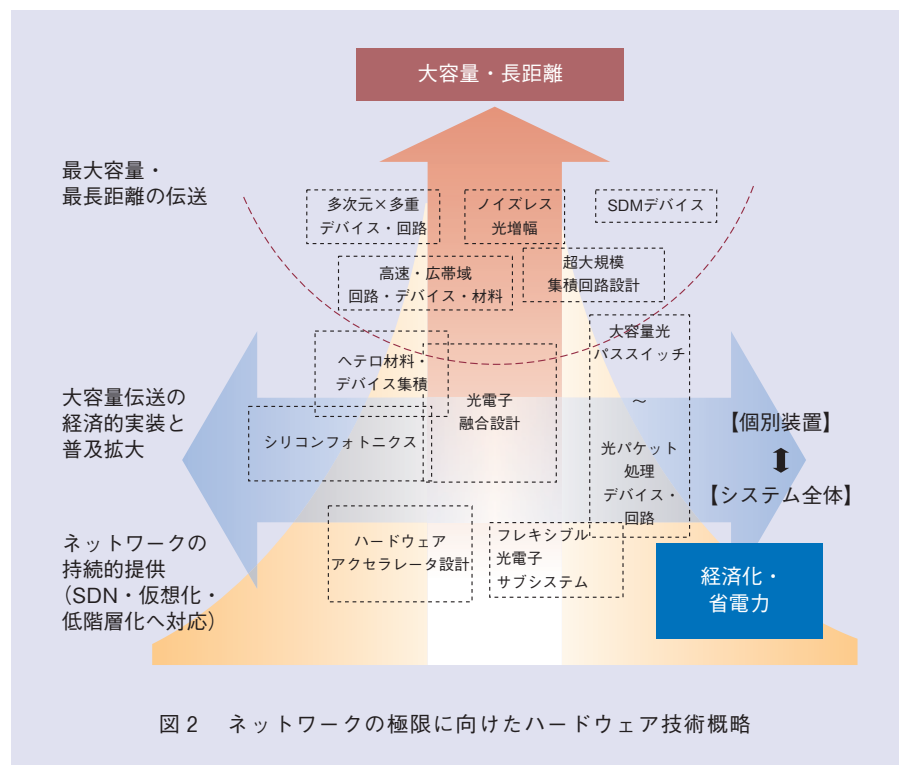


図2 ネットワークの極限に向けたハードウェア技術概略

ルレート向上は、同一のサブキャリア数・多値度のもとで大容量化できるため、超大容量トランシーバの簡略化のために有利です。現在普及が進む100 Gbit/sのデジタルコヒーレント通信でのシンボルレートは32 Gbaudですが、さらなる高速化の研究が進められています。本特集記事『超大容量光伝送に向けた高速電子デバイスおよび光デバイス技術』では、InP化合物半導体を用いた超高速集積回路技術と高効率な光時分割多重 (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) 技術の光電子融合による大幅な高ボレート化への挑戦について紹介します。

■ 抜本的大容量化をねらうSDM (空間分割多重) 技術

従来のシングルモード光ファイバの物理限界を超える桁違いの大容量化をねらった空間分割多重 (SDM: Space Division Multiplexing) 技術⁽⁶⁾の研究開発が精力的に進められています。SDMは1本の光ファイバ内に多数のコアを有するマルチコアファイバ、あるいは1コア内で複数の導波モードで伝送するマルチモード化により、光ファイバの空間の自由度を最大限に活用し、一気に数10倍の伝送容量拡大を実現する画期的な技術です。SDMの実現に向けては、多数コアを有する光ファイバやコア内のモード間の干渉等を補償する信号処理方式技術に加え、長距離通信に向けたマルチコア・マルチモードに対応するための光増幅装置であるエルビウム添加光ファイバ増幅

器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)、シングルモードファイバからの分岐・収束部に必要な接続デバイスなどのハードウェアの研究開発が進められています⁽⁷⁾。

■ 「シャノン限界に挑む」：雑音を発生しない光増幅への挑戦

シャノンの定理によれば、通信路の通信路容量 C は、 B は通信路の帯域幅、帯域 B 内の信号の平均の強さを S 、正規分布ノイズの強さを N としたとき、次式で表されます。

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

式のうえで、伝送容量を増大するためには信号光のパワー S を強くすれば良いのですが、光ファイバ通信においては、入力する光パワーが増大すると、光ファイバの非線形効果により信号が歪んでしまうため、むしろ S/N 比 (信号雑音比) が劣化してしまうことが指摘されています。このため伝送容量増大にはノイズ N を低減することが重要になります。しかしながら現在光通信に用いられているEDFAでは、過剰雑音の混入により理想的な場合でも入力光の S/N 比は半分劣化してしまいます。このような状況の中、NTTでは S/N 比劣化を大幅に改善する技術として、高い非線形光学効果を持つPPLN (Periodically Poled Lithium Niobate)^{*4}デバイスによるパラメトリック増幅技術を用いた位相感応増幅 (PSA: Phase Sensitive Amplifier) という画期的な技術により、光信号増幅時の S/N 比劣化を劇的に低減するこ

とに挑戦しています。PSAでは理論的に S/N 比劣化がない増幅が可能であり、理想的には伝送距離の倍増が期待されます。詳しくは本特集記事『極限に挑む低雑音位相感応光増幅技術』で紹介します。

ネットワークの経済化革新を目指すハードウェア技術 (小型・低電力化への方向性)

■ デバイスレベルの光電子融合：シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスは、シリコン上に光素子を用いた集積回路をつくる技術であり、将来のネットワーク革新への起爆剤となる技術として期待が高まっており、大きな魅力の1つが「光回路の超小型化」です。一般に光回路で用いられるガラス (SiO_2) 材料に対して、導波路の加工寸法や曲げ半径が桁違いに小さくなり、従来数cmサイズであった光回路をmmサイズ以下に抑えられます。さらに高機能な信号処理を得意とするシリコンCMOS集積回路との集積が可能となり、まさに光と電子を融合したシステムオンチップ (SoC) が低価格・小型に実現できることとなります。これまでもNTTは多並列一体集積WDMレシーバなど、世界を先導する研究成果を挙げています⁽⁸⁾。本特集記事『シリコン基板上集積横注入薄膜レーザ』では、シリコン基板上にInP薄膜による低消費電力レーザを一体集積する最先端の光源集積技術について紹介します。シリコ

*4 PPLN: 周期的分極反転ニオブ酸リチウム、非線形光学材料。

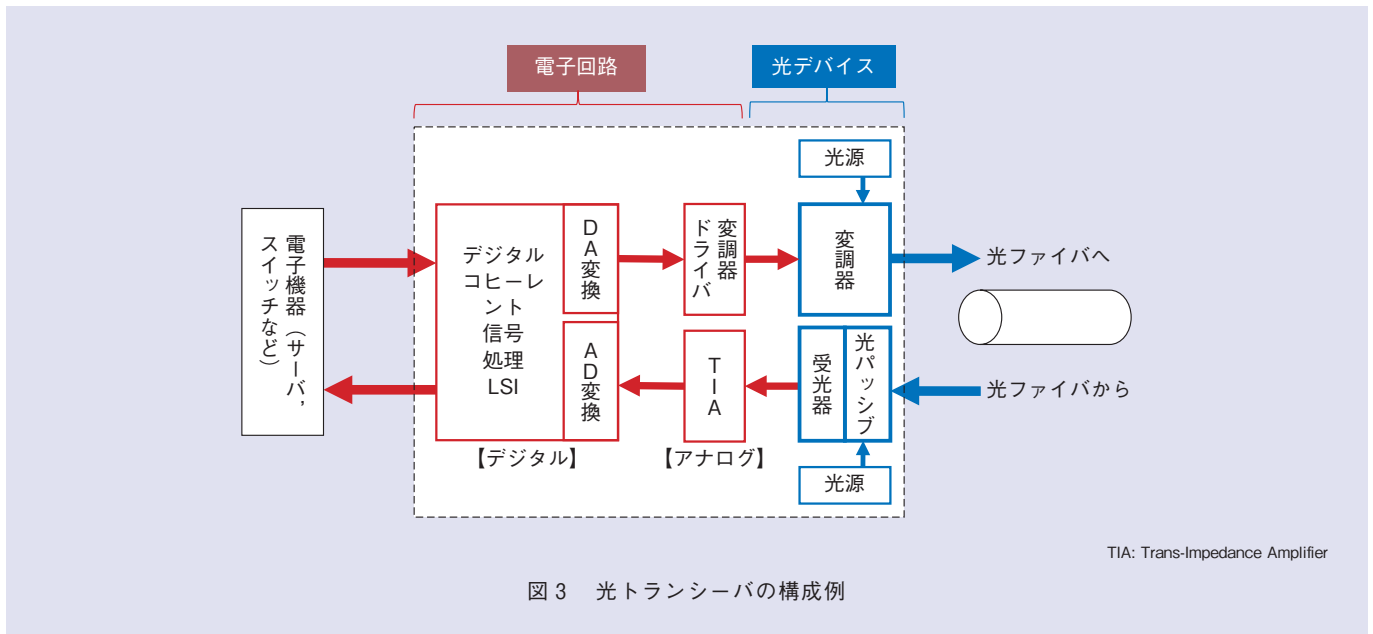


図3 光トランシーバの構成例

ン自体の発光効率が著しく低い、というシリコンフォトニクス普及への最大の障壁を乗り越える、真の光電子融合デバイス実現に向けた挑戦的な取り組みです。

■デバイスレベルの光電子融合：「デジタルモックアップ」を目指す光電子融合設計

ハードウェアの抜本的な経済化に向けた2番目のポイントが「設計コストの低減」です。図3に示す光トランシーバのようなネットワーク用ハードウェアは光・電子デバイスの両方から構成されています。従来の設計では、例えば光回路だけをあらかじめ性能予測・簡易モデル化し、電子回路シミュレータに取り込み、全体を性能予測する手順が取られています。しかし、性能予測が難しく、試作の繰り返しが必要となり、結果として設計・製造コストの

増大につながっていました。本特集記事『デジタルモックアップ実現に向けた光電子融合設計技術』では、光回路と電子回路を精度良く一体シミュレーションする環境を実現することにより、試作なしで光モジュールの性能を精度良く見積ることができる、まさに“デジタルモックアップ”の実現を目指す技術を紹介します。今後シリコンフォトニクスをはじめ、光電子融合の深化により光・電子回路の境界が物理的にも機能的にも良い意味であいまいになってきます。そのような時代に、光電子融合デバイスとしての最高性能を絞り出す設計を可能とする技術として期待されます。

データセンタの拡張性を高める超高速光スイッチデバイス技術

クラウドコンピューティング環境を

支え、そして今後のビッグデータ処理を担う大規模データセンタでは、数10万台を超えるサーバが多数のノード装置（L2/L3スイッチやルータ）により階層的に接続されています。しかしながら、多段・多数のノード装置による大きな遅延時間や膨大な消費電力は、深刻な課題です。現在のルータやスイッチは集積回路から構成される電子装置ですが、ムーアの法則^{*5}の限界に近づきつつある状況で、その課題解決を回路の高速・低電力化だけに頼ることが難しくなっています。本特集記事『フォトリックデータセンタ実現に向けた高速光スイッチ技術』では、従来の電気ルータやスイッチが担って

*5 ムーアの法則：米インテル社の創設者の一人であるゴードン・ムーアが提唱した集積回路の進化を予測する指標。半導体の集積密度は18~24カ月で倍増するという法則。

きたパケット単位での転送処理を光のまま実現する挑戦的研究について紹介します。光電気変換を極力不要とした低遅延の光転送により、データセンターネットワークの電力と遅延増大の抜本的課題解決を図ります。NTTでは、ナノ秒という超高速な光スイッチデバイスと電気バッファ(集積回路メモリ)を適材適所で組み合わせた光電子融合型光パケットルータを提唱し、光パケット転送技術の研究開発で世界を先導しています。

SDN・仮想化の進展に向けたハードウェア技術

ネットワークのCAPEX/OPEX低減に向け、ネットワークの仮想化の検討が進んでいます。ネットワーク機能仮想化(NFV: Network Function Virtualisation)は専用装置として実装されてきたネットワーク機能をソフトウェアとしてサーバ上で動作させる技術であり、仮想化によるハードコスト低減に加え、柔軟なりソース割当てや迅速なサービス提供・変更などのメリットが期待されます⁽⁹⁾。このようなソフト志向の時代ならではのハードウェア技術の出番は、“柔軟性と高性能の両立の実現”にあります。汎用サーバは最先端のマイクロプロセッサで構成されます。しかし、今後の半導体の性能向上の速度はネットワークに期待される大容量化の速度より遅く、将来の本格的なテラビット時代を迎えるにあたり、より柔軟なNFVで速度、電力といった性能を求めることが困難

になると予想しています。本特集記事『ネットワーク仮想化時代のソフト・ハード協調設計技術』ではSDN・仮想化時代ならではのハードウェア技術の研究の1つの方向性として、ハードウェア加速器の技術について紹介します。通信性能向上のボトルネックとなる機能を厳選し、よりハードワイヤードな方法で実装することで、汎用サーバ上で実行されるNFVの性能をコストパフォーマンス良く高めるのがねらいです。特にNTT未来ねっと研究所がオープンソースソフトウェアとして普及を進めるソフトウェアスイッチ“Lagopus⁽¹⁰⁾”との連携での性能加速効果を実証しています。

参考文献

- (1) http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/white_paper_c11-520862.htm
- (2) https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf
- (3) http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/Cloud_Index_White_Paper.html
- (4) 宮本・佐野・吉田・坂野：“超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2011.
- (5) <http://www.ntt.co.jp/news2015/1503/150319a.html>
- (6) 宮本・竹ノ内：“毎秒ペタビット級伝送の実現を目指した高密度空間多重光通信技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.26, No.8, pp.52-56, 2014.
- (7) K. Shibahara, T. Mizuno, H. Takara, A. Sano, H. Kawakami, D. Lee, Y. Miyamoto, H. Ono, M. Oguma, Y. Abe, T. Kobayashi, T. Matsui, R. Fukumoto, Y. Amma, T. Hosokawa, S. Matsuo, K. Saitoh, H. Nasu, and T. Morioka: “Dense SDM (12-core X3-mode) Transmission over 527 km with 33.2-ns Mode-Dispersion Employing Low-Complexity Parallel MIMO Frequency-Domain Equalization,” OFC 2015, doi:10.1364/OFC.2015.Th5C.3, March, 2015.
- (8) C. Kachris, K. Kanonakis, and I. Tomkos: “Optical Interconnection Networks in Data Centers: Recent Trends and Future Challenges,” IEEE Communications

Magazine, Vol.51, No.9, pp.39-45, 2013.

- (9) 有満・松本・松林・相原・横林・小島・小杉：“ネットワーク仮想化に向けた技術開発の現状,” NTT技術ジャーナル, Vol.26, No.5, pp.6-9, 2014.
- (10) 尾花・山田・中島・益谷・島野・福井：“ネットワーク仮想化に関する基礎技術研究動向,” NTT技術ジャーナル, Vol.26, No.5, pp.23-27, 2014.



(左から) 橋本 俊和/ 野坂 秀之/
宮崎 昭彦/ 竹ノ内 弘和/
武藤 伸一郎 (右上)

NTT先端集積デバイス研究所では、今後もネットワークの極限性能を目指し、社会的・産業的インパクトの大きい光電子融合ハードウェア技術の研究開発を推進していきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所

光電子融合研究部

TEL 046-240-2771

FAX 046-240-2107

E-mail sende-kensui@lab.ntt.co.jp