特集

IOWN構想特集 ーオールフォトニクス・ネットワーク 実現に向けた光電融合技術—



本特集では,NTT R&Dが提唱するIOWN (Innovative Optical and Wireless Network)構想とその構成要素であるオールフォトニクス・ネットワークについて,めざす未来とそれを実現するための技術について概説する.

Alpha Photoconfo 4 NT 核術 - 7ル 202.8

オールフォトニクス・ネットワーク、光電融合技術のめざす未来

オールフォトニクス・ネットワークの実現において超低遅延・超低消費電力化の鍵となる光 電融合技術とそのロードマップについて紹介する.

シリコンフォトニクス技術による光電融合型光送受信モジュールの開発

シリコンフォトニクス技術を活用した超小型光送受信回路と、電子デバイスのコパッケージ化 による、光インタフェースの超小型化および経済化技術について紹介する.

高密度・低消費電力な短距離光インターコネクションに向けたデバイス技術

Si光回路との高い集積性を備えCMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) ドライバにより低消費電力で駆動できるSi基板上薄膜直接変調レーザを紹介する.

ナノフォトニクス技術による光電融合アクセラレータへの研究展開

S

NTTナノフォトニクスセンタが研究している光パスゲート回路,光電変換素子,光非線形素子の各技術について紹介し,これらを集積させることで可能となる「光電融合アクセラレータ」への道筋を示す.

Network

23

15

6

オールフォトニクス・ネットワーク, 光電融合技術のめざす未来

NTT R&Dが提唱する IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)構想とその構成要素であるオールフォトニクス・ネットワークについて、本稿ではめざす未来とそれを実現するための技術について概説します.また、オールフォトニクス・ネットワークの実現において超低遅延・超低消費電力化の鍵となる光電融合技術とそのロードマップについて紹介します.

そうがわ てつおみ とみざわ まさひと 将人*2 哲臣 寒川 富澤 おかだ ごとう ひでき あきら 110^{† 3} 秀樹*4 副田 後藤 NTT先端技術総合研究所 所長†1

× オーレフォトニカス・ ネットワーカ × 光電融合技術

TOWN

NTTデバイスイノベーションセンタ 所長^{†2}
 NTT先端集積デバイス研究所 所長^{†3}
 NTT物性科学基礎研究所 所長^{†4}

IOWN構想とは

NTT R&Dは、多様性を受容する豊かな社 会の構築をめざしています。多様性に満ちた 新たな世界を可能とするのは他者への理解で あり、理解を深めるためには他者の立場に 立った情報や感覚を得ることが大きな助けに なるでしょう。研究開発を通じてこの世界を 実現するためには、これまで以上に高精細で 高感度なセンサにより多くの情報を得ること はもちろん、人間の感覚や主観にまで踏み込 んだ情報処理が要求されます。

このような将来像に向けて、NTT R&Dは 新たなコミュニケーション基盤であるIOWN (Innovative Optical and Wireless Network)構想を提唱しました.光を中心 とした革新的技術で,超大容量・超低遅延・ 超低消費電力を特徴としたネットワークと情 報処理基盤の実現をめざしており、2030年の 実現に向けて,パートナーの皆様とともにさ まざまな議論を始めています.

IOWN構想は次の3要素から構成されてい

ます.ネットワークから端末まで,すべてに フォトニクスベースの技術を導入する「オー ルフォトニクス・ネットワーク(APN)」,あ らゆるものをつなぎその制御を実現する「コ グニティブ・ファウンデーション(CF)」,実 世界を表す多くのデジタル情報を掛け合わせ, モノやヒトの相互作用をサイバー空間上で再 現・試行可能とする新たな計算パラダイム「デ ジタルツインコンピューティング(DTC)」 です.対象となるレイヤはそれぞれ異なって いますが,これら3要素が組み合わさること で,新時代のネットワークと情報処理が実現 できると考えています.

APNの重要性

IOWN構想の3要素の中で新たな光通信と 情報処理の基盤となるのがAPNです.APN の大きな特徴は、従来の「エレクトロニクス」 から「フォトニクス」への転換により、ネッ トワークから端末のエンド・ツー・エンドで、 最大限光技術を導入することで、低消費電力 かつ高速な情報伝送と情報処理基盤の実現を





めざします(図1).低消費電力化について は、後述する光電融合技術の導入により、電 力効率を100倍にすることが目標です.また、 伝送容量については、1つのファイバ中に多 くのコアを並べたマルチコアファイバやコヒー レント用光送受信器(COSA: Coherent Optical Sub Assembly)などの開発によっ て、125倍に高めることをめざします.さら に、例えば遅延が許されないデータ伝送につ いてはデータを圧縮せずに伝送することで、 エンド・ツー・エンドでの遅延を200分の1 に減らすことをめざします.

APN のめざす世界観

APNが実現すると新たな活用シーンの誕 生が期待できます. 革新的な大容量化によ り,これまではデジタル変換の段階で意図的 にデータ量を削減していた情報を,より原信 号に近い精細な状態で送受信することが可能 になります.もし,蜂の視覚,犬の嗅覚,コ ウモリの耳をナチュラルにとらえて丁寧に拾 い上げていけば,人間の五感を大きく拡張し ていくことができ,人に寄り添い人の能力を 高めた社会を実現することができるでしょ う.また,光ファイバ伝送において機能やサー ビスごとに異なる光の波長を割り当てれば, 複数の情報を同時に低遅延で送ることも可能 になります.例えば、多チャネルで高精細な 画像を送りながら、遅延のないインテラクティ ブなやり取りをすることも可能になり、遠隔 手術やMaaS(Mobility as a Service)な ど通信品質に対する要求がクリティカルな現 場での実用化もみえてきます.

光電融合技術とは

APNを実現するためには、光技術を従来 のような長距離伝送やデータセンタ内イン ターコネクトなどの中距離伝送だけでなく、 プロセッサチップ内の信号処理部にも光と電 子を導入した「光電融合技術」が必要になり

ます.

光電融合技術の試金石となる研究成果が, 世界最小の消費エネルギーで動く光電変換デ バイスであり,2019年4月15日,英国科学誌 「Nature Photonics」に発表されました. 電子回路の一部に光を融合する技術は,20年 以上前に研究されてきましたが,デバイスの サイズや消費電力が大きく,実用技術として は確立されませんでした.今回の研究成果 で,従来のものに比べて消費電力を94%カッ トできたことで,実用化の可能性が高まった といえます.

光電融合技術のロードマップを図2に示します.まずは、ファイバとシリコンフォトニ



特集

クスにより実装された回路,アナログIC等 を集積した構造を実現し,チップ外部との接 続速度を高速化します(Step1).次に,チッ プ間を超短距離の光配線により直接接続し, 情報処理能力を向上させます(Step2).最 後に,チップ内のコア間を光配線で接続し, 光の特性を活かした光トランジスタや光パス ゲート技術を適用して低消費電力化するとと もに,演算を光回路の通過時間のみで瞬時に 実現します(Step3).

本特集の内容について

今回は、NTT先端技術総合研究所におけ るAPN実現に向けた光電融合技術の取り組 みについて特集します.Step1の取り組みか らは、シリコンフォトニクス技術を活用した 超小型光送受信回路を取り上げます.続く Step2からは高密度・低消費電力な光イン ターコネクション技術について,Step3から はナノフォトニクス技術を利用した光電変換 デバイスや光パスゲート回路について紹介し ます.



(上段左から)	寒川	哲臣	/	富澤	将人
(下段左から)	岡田	顕	/	後藤	秀樹

IOWN構想の中で新たな光通信と情報処理の基 盤となるオールフォトニクス・ネットワークと、超 低遅延・超低消費電力化の鍵となる光電融合技術の 実現に向けて、研究開発を推進していきます.

◆問い合わせ先
 NTT 先端技術総合研究所
 企画部
 TEL 046-240-5157
 FAX 046-240-2222
 E-mail science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

シリコンフォトニクス技術による 光電融合型光送受信モジュールの開発

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)構想の実現に 向けたオールフォトニクス・ネットワークの実現に向け、光電融 合型の超小型光送受信モジュールの開発を行っています。シリコン フォトニクス技術を活用した超小型光送受信回路と、電子デバイス のコパッケージ化による、光インタフェースの超小型化および経済 化技術について紹介します。

なす ゆうすけ やまなか しょうご 那須 悠介 山中 祥吾 NTT デバイスイノベーションセンタ

シリコン フォトニカス× デジタル コヒーレント×

СОЅА

はじめに

通信機器の多様化とともに、通信ネット ワークを経由したサービスの増大が進み、ネッ トワーク内でIT機器の処理すべきデータ量 や消費電力は飛躍的に増大しています。今後 も伸び続けるトラフィックへの対応と、さら なる大容量、低遅延、低消費電力、かつ柔軟 性に優れた通信ネットワークを提供するため、 NTTは新たなネットワークIOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構 想の実現を提案しました。

IWON構想を構成する3つの柱の内の1 つ、オールフォトニクス・ネットワーク(APN) は、ネットワークから端末まであらゆる所に フォトニクス技術の導入を図るというもので す.APNでは、ネットワークにおける短距 離伝送から長距離伝送に至るあらゆる情報伝 送において、フォトニクス(光技術)の利用 を図り、圧倒的な低消費電力、高品質・大容 量、低遅延の伝送を実現します.従来の光技 術は、伝送距離が比較的長いエリアに適用さ れてきました.より短距離の通信にも光技術 を導入するためには、光を操るデバイスの圧 倒的な小型化や経済化、性能向上が必要とさ れます、そこで、重要となってくるのが、光 と電気を一体に集積し、より効率的な動作を 可能とさせる光電融合技術です。

光電融合技術とは、光回路と電気回路を融 合させ、小型・経済化に加え、高速・低消費 電力化など、さまざまな性能向上を図るもの です、ネットワーク内の光インタフェースに 配置される光送受信部から、将来的には、1 つのLSIチップ内における信号伝送を担う光 送受信部まで、光電融合により光電融合回路 の集積規模が拡大するほど光技術の適用範囲 が広がります.

NTTデバイスイノベーションセンタでは、 ネットワーク内の光インタフェースの小型化 および低消費電力化、伝送速度の拡大をめざ し、シリコンフォトニクスという技術を用い た光送受信モジュールの開発を行っていま す、シリコンチップ上に小型の光送信回路 や、光と電気の変換機能を実現する光受信回 路を集積し、これを電気の増幅器等のアナロ グ電子回路とコパッケージすることで、光電 融合型の光送受信モジュールとなります. こ れをデジタルコヒーレント用の光モジュール に適用することで, 圧倒的な光トランシーバ の小型化を実現でき, このような光送受信モ ジュールを私たちはCOSA(コサ:Coherent Optical SubAssembly)と称し, 開 発を進めています. このような光電融合技術 は, 光ネットワーク内の光インタフェース部 分を大幅に小型化し, ネットワークの経済化 や伝送システムの小型化に寄与できます.

シリコンフォトニクス

NTT先端技術総合研究所では、世界に先 駆けて、シリコンフォトニクスを研究開発し てきました。シリコンフォトニクスとは、大 規模集積回路(LSI)技術によって培われて きた微細加工技術を用い、通信波長帯(1.3 ~1.5 µm)において透明なシリコンを光集 積回路のプラットフォームとして活用する技 術です。

シリコンフォトニクスは、シリコン上に単 純な光受動素子だけでなく、変調器や Ge (ゲ ルマニウム) PD (Photo Detector) など の集積も可能であるという特徴を持ちます.

NTTでも、2000年代初頭より、基盤的研究 としてシリコンフォトニクスに取り組み、さ まざまな要素技術の検討を進めてきまし た⁽¹⁾. 光トランシーバ内の光デバイスは、従 来、それぞれ異なる材料系を用いて実現され、 光ファイバや空間光学系などで相互に接続さ れていました. NTTは、キーとなる光デバ イス群をシリコンフォトニクスにより実現し、 それらを1つのチップ上に集積することに成 功しています. このようなシリコンフォトニ クスチップを、電子回路とともに同一パッケー ジ内へ実装することで光デバイス部分の超小 型化が達成できます.

デジタルコヒーレント用光送受信 モジュール(COSA)

デジタルコヒーレント伝送は、その強力な 電気補償技術によって光伝送における信号劣 化を補償することができ、これまで数百~数 千kmの長距離伝送用途として発展してきま した、現在では、特にトラフィックの増大が 顕著となっているデータセンタ間等の比較的 短距離用途としても、このようなデジタルコ ヒーレント伝送技術の適用検討が進んでいま す. 光伝送用のデバイスの標準規格を策定す る業界団体「OIF (The Optical Internetworking Forum) は、デジタルコヒーレン ト用光トランシーバの消費電力やサイズにつ いての規格を定めています. 同団体は2012 年以降1~2年ごとにデジタルコヒーレント 用光トランシーバの新規格を策定し、そのた びにサイズの小型化を要求しています。2012 年ころには、5×7インチ(1インチは2.54 cm 相当なので12.7×17.8 cm)の大きさだった ものが、最近、QSFP-DD (Quad Small form Factor Pluggable-Double Density)と呼ばれる2×8cmまでに小型 化されたトランシーバサイズが要求され、伝 送速度の規格も100 Gbit/sから400 Gbit/s へと増大しています。小型化と伝送速度の拡 大が要求される背景には、データセンタなど における装置の高密度配置に対するニーズが あります. その一方, 適用領域の拡大のため には、装置のさらなる経済化も必要です、こ のようなデジタルコヒーレント用光トランシー バの光送受信部に対し、光電融合技術である

シリコンフォトニクスの適用を行ったのが、 NTTが提案したCOSAです⁽²⁾.

COSAの概念図を図1(a)に示します。1つ のパッケージ内に、シリコンフォトニクスチッ プ. 受信用PDの出力電流を電圧信号に変換 するTIA (TransImpedance Amplifier). 送信変調器を駆動するためのドライバが集積 されています. シリコンフォトニクスチップ 内には、送信側にはIQ変調器と偏波回転合 流器(PBCR: Polarization Beam Combiner Rotator). 受信側にはコヒーレント 受信器を構成する偏波分離回転器(PBSR: Polarization Beam Splitter Rotator) 光 90度ミキサー、高速PD(Photo Detector) アレイが集積され、さらに送信受信の 光信号パワー監視するモニター用PDが集積 されています、従来は、これら光デバイスは それぞれ異なる材料系を用いて別々のデバイ スとして実現されており、光ファイバ等で相 互に接続されていたため、サイズの小型化に は限界がありました.私たちは図1(b)に示 すように、これらキーとなる光デバイス群を シリコンフォトニクス技術により1つのチッ プ上に集積しました.このチップを、ドライ

バおよびTIA等の電子デバイスとともにパッ ケージへ実装し,400 Gbit/s 伝送に対応し た小型の光送受信モジュールを実現しました.

小型化に寄与する他の要素として、温度コ ントロール部を省略できたこと、パッケージ に気密性が必要ではないことも、挙げられま す.これらは、シリコンの持つ高い屈折率や 材料安定性など、材料特性を最大限に活用し つつ. 独自の光回路設計を適用することで特 性の温度無依存化や耐湿性を実現した結果に よるものです。また、光ファイバの端面を直 接シリコンフォトニクスチップに接続できた のも小型化やデバイスの低背化に貢献しまし た.図2はCOSAの外観写真です.COSA は現在、パッケージサイズとして19×12× 2.1 mmと、極めて小型で薄い外形で実現で きています. デジタルコヒーレント用光トラ ンシーバの小型化が進んでいる現在, COSA の適用により、さらなる小型化が加速される ことが期待できます.

COSAの組み立て時,および使用(光ト ランシーバ内の実装)時のプロセスを図3に 示します.パッケージ上に半田印刷とリフ ローにより部品を搭載後,チップを搭載しま



特集

す.その後,高速電気信号,制御信号,およ び給電の入出カインタフェースとなるBGA (Ball Grid Array)を形成し,リッドを固定 して完成します.これらのプロセスでは,実 装の完全自動化が実現されており,COSA の高生産性と経済化に寄与しています.ま た,光トランシーバのPCB (Printed Circuit Board)基板に実装する際も,COSA は BGAインタフェース技術の採用により, 他の電子部品と同時かつ自動でリフロー実装 が可能となりました.従来の光デバイスの多 くは,PCB基板に電子部品をリフロー実装 した後に個別に実装する必要があったため, 実装工程の煩雑性が課題となっていました が,COSAの適用により,光トランシーバ



図2 COSAの外観

実装工程の大幅な簡略化が実現されます.

今後の展開

APNの描く将来は、ネットワークのあら ゆる情報伝送においてフォトニクスへの転換 を図られた、革新的な光ネットワークの実現 です. 光技術をより短距離の信号伝送や端末 まで適用するためには、光送受信モジュール のさらなる小型・経済化や伝送速度の向上が 求められます.現在.COSAにおいてパッ ケージ内に集積されている電子回路は比較的 小規模なものですが、今後はさらに大規模か つさまざまな機能を有する電子回路とのコ パッケージ化により、モジュールの小型経済 化が進むと思われます.また.光送受信機能 としての伝送速度向上も求められますが、光・ 電気回路間を極限まで近接させ、回路間の伝 送速度の劣化を抑制し得る光電融合技術は, その進展を加速すると期待されます.

すでにNTTデバイスイノベーションセン タでは、このような光電融合の展開を見据え、 COSAの伝送速度を大幅に向上するための 研究開発を進めています⁽³⁾.すでに開発した 400 Gbit/s伝送用の64 Gbaud対応COSA に比べ、伝送速度を大幅に向上させ、100





図4 COSAの帯域特性

Gbaud級の伝送を可能とするCOSAの実験 に成功しています.新たなCOSAの送信帯 域および受信帯域特性を図4に示します.シ リコンフォトニクスチップのみならず、コパッ ケージング技術の改良により、大幅な動作 帯域の拡大に成功し、伝送実験においても 100 Gbaud級の動作確認を行いました.今 後の光電融合の進展により、小型・経済化と ともに、伝送速度の向上が期待でき、継続し て研究開発を進めていきます.

■参考文献

- 特集: "新世代通信を拓くシリコンフォトニクス技術," NTT技術ジャーナル, Vol. 21, No. 12, pp. 12 - 35, 2009.
- 柏尾・那須: "Beyond 100 G 光トランスポートネットワーク用光送受信器," NTT技術ジャーナル, Vol. 28, No. 7, pp. 15-17, 2016.
- (3) S. Yamanaka, Y. Ikuma, T. Itoh, Y. Kawamura, K. Kikuchi, Y. Kurata, M. Jizodo, T. Jyo, S. Soma, M. Takahashi, K. Tsuzuki, M. Nagatani, Y. Nasu, A. Matsushita, and T. Yamada: "Silicon Photonics Coherent Optical Subassembly with EO and OE Bandwidths of Over 50 GHz," OFC2020, PDP, Th4A.4, 2020.



(左から) 那須 悠介/山中 祥吾

NTTデバイスイノベーションセンタのシリコン フォトニクスを活用した光送受信モジュールの開 発について紹介しました. APNの描く,よりスマー トな社会の実現に向けて,これからもフォトニク スを活用した基盤技術の研究開発に取り組んでい きます.

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンタ 企画部 TEL 046-240-2403 FAX 046-270-3703 E-mail dic-kensui-p@hco.ntt.co.jp

高密度・低消費電力な短距離光インター コネクションに向けたデバイス技術

情報処理基盤の高速化と低消費電力化に向け, ボード内の短距離通信に光技術を適用した光イン ターコネクションが検討されています.本稿では, Si光回路との高い集積性を備えCMOSドライバに より低消費電力で駆動できるSi基板上薄膜直接変 調レーザを紹介します.

たけだ	こうじ 浩司	藤井	たくろう 拓郎		としき 俊樹
しかま	こうた	bet	ひとし		^{ひでたか}
鹿間	光太	脑田	斉		英隆
さとう	ともなり	っちざわ	tu	せがわ	とおる
佐藤	具就	土澤	泰	瀬川	徹
さとう 佐藤	。」。 昇男	まつお 松尾	பகம் 慎治		

× 光インター フネカション×

レーザ

NTT先端集積デバイス研究所

はじめに

IoT (Internet of Things)の進展やAI (人 工知能)の利用拡大により、従来の予想を超 える膨大なデータが取り扱われるようになり 今後もこの傾向は持続すると考えられていま す. このデータ処理の増大により情報通信機 器の消費電力も加速度的に増大すると推定さ れています(1). このままトラフィックが伸び 続け、情報通信機器の性能が変わらないとす ると2030年には日本の年間消費電力量の倍近 い電力を情報通信機器が消費する予測もあり ます.特に、データ処理は大規模なデータセ ンタに集約される傾向にあり、データセンタ に必要な電力も加速度的に増大しています. 例えば、日本のデータセンタの消費電力は、 2015年時点で日本の年間消費電力の1%とい う試算があり、データの処理や伝送にかかる 消費電力の低減が重要といえます.

このような背景のもと提案されたIOWN

(Innovative Optical and Wireless Network)構想では超低消費電力を1つの 特徴とし、その実現のために、長距離通信で 培った技術を短距離にも適用する光電融合技 術の研究開発を進めています、現在までに光 通信技術は国際間の長距離通信や国内のメト ロ・アクセス網に適用され、近年ではデータ センタ間の通信に、さらにはデータセンタ内 のラック間やボード間の通信に適用されてい ます.一方,ボード内や大規模集積回路(LSI: Large Scale Integrated Circuit) 間の通 信には電気配線が用いられています.しかし、 電気配線は、データの速度や伝送距離の増加 に伴い伝送損失が大きくなるというデメリッ トがあります.一方,光配線は,それらが増 大しても損失は一定であり消費電力の増加は 小さいという特徴があります.NTTでは. ボード内の短距離通信に光技術を適用し. データの処理や伝送にかかる電子機器の高速 化と低消費電力化をめざす光インターコネク

ションの研究開発を進めています.

短距離光インターコネクションに向けた デバイス技術

情報処理用の光インターコネクションに必要なブロック構成を図1(a)に示します.情報処理用のLSIの直近に光送受信器を配置して電気信号を光信号に変換して行います.より短距離に光通信技術を適用していくためには、半導体レーザ(LD: Laser Diode)をはじめとする光デバイスの高密度集積化と低

消費電力化が必須です.図1(b)に,さまざ まな距離で用いられている直接変調LDの, 活性領域の大きさと消費エネルギーの関係を 示します.一般にLDは,活性領域が大きい ほど大きな光強度のレーザ光を出射できる一 方,変調時の消費エネルギーも大きくなりま す.テレコムでは長距離伝送のために大きな 光強度が求められ,大きな活性層領域を持つ 半導体レーザが必要になります.ボード間伝 送といったデータコムでは,エネルギーコス トを低減する必要性が増します.現在の短距



(a) LSIチップ間光インターコネクションのブロック図



(b) 活性領域面積と消費エネルギーの関係

図1 LSIチップ間光インターコネクションのブロック図,および直接変調LDの活性領域と消費エネルギーの関係

離通信でもっとも広く用いられる光源である 面発光レーザ (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は、その形状か ら多モード発振しやすく波長多重(WDM) 技術の適用には向きません。通信容量を増大 させるために、単一モード発振するLDと、 高密度集積可能な波長多重回路の集積が求め られます。また、VCSELは活性層領域を決 定する共振器長を比較的短くできますが.活 性層領域の微小化には限界があります. この ような背景からNTTでは、ボード内光イン ターコネクション用の光源としてSi基板上 に作製した薄膜(メンブレン)直接変調LD を開発しています. Si基板上にLDを作製す ることで、波長多重回路や受光素子といった 光デバイスを高密度かつ低コストに作製可能 なSiフォトニクスの技術が適用できます. さらに、屈折率の低いSiO。層の上にLDを形 成することで、光と注入キャリアとの高い相 互作用により、レーザの小型化と低消費電力 化を実現できます。また、私たちはさらに微 小な活性層領域からなるLDを実現するため に、フォトニック結晶を用いたLDを開発し ています.

本稿では、Si基板上LDの作製方法と特性 について述べ、これを駆動するための相補型 金属酸化膜半導体(CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)技術を用い たドライバ回路設計技術を述べます. さらな る小型化と低消費電力化に向けて取り組んで いるフォトニック結晶を用いたLDについて 述べます.

Si基板上薄膜(メンブレン) 直接変調レーザ

Si基板上LDの作製方法を図2(a)に示しま す⁽²⁾. 最初にSi基板上に光回路を形成し、イ ンジウムリン (InP: Indium Phosphide) お よび活性層からなる化合物半導体薄膜層をウ エハ接合します、その後にLDの活性層となる 部分のみを残して島状に加工し, InPで再成長 することで、薄膜InP中に島状の活性層が埋 め込まれた(BH: Buried Heterostructure) 構造を形成します。この活性層に対して電流 を注入するために、活性層の両脇にそれぞれ n型、p型のドーピングをSiイオン注入、お よびZn熱拡散を用いて形成します.NTTの Si基板上LDは、活性層上下が屈折率の低い SiO。で形成されていることから、活性層に 対して非常に高い光閉じ込めを実現できま す。さらに活性層の周囲がバンドギャップの 大きいInPで囲われている構造から、注入さ れたキャリアを活性層に閉じ込める効果も有 します. これらの特徴から、Si基板上LDは 光・キャリアの高い相互作用によって小型化・ 低消費電力化を実現できます. 作製したSi 基板上LDの構造を図2(b)に示します. レー ザ構造は、分布帰環 (DFB: Distributed Feedback)領域の背面側にInP導波路から なる分布ブラッグ反射鏡(DBR)を持つ分 布反射型(DR)を用いています.背面DBR によって、LD前面側から選択的に光を出射 させることができ、BHを小型化することが できます. LD前面側にはSiO,導波路による スポットサイズ変換器(SSC)を集積し、





(b) Si基板上LDの構造図 2 Si基板上LDの作製方法と構造

光ファイバと効率的に光結合が可能です.

作製したLDの注入電流-光出力特性を**図 3**(a)に示します. ここでは活性層として InGaAIAs量子井戸を用いました. しきい値 電流1.6 mA, 発振波長1.3 μm帯での室温連 続発振を実現し, 95℃まで発振が可能で した. 図3(b)はLDを同一基板上に8つ集積 した素子の25.8 Gbit/sでのNRZ(Non-Return-to-Zero: 非ゼロ復帰) 信号による 直接変調波形で, すべてのLDで良好な通信 品質を意味するアイ開口を得ることができま した.LD単体としての消費エネルギーは 200 fJ/bitとなり、この値はVCSELに匹敵 しています.また、同構造は波長多重回路と もモノリシックに集積可能です⁽³⁾.私たちは このように単一モード発振可能で、集積性に 優れた低消費電力光源を実現しました.

CMOSドライバ回路集積技術

ここではLDを駆動するための電気回路に



ついて説明します. LDを発光させるために は電流を流して駆動することが必要です. 一 方, LSIなどの一般的なデジタル電気回路は 電圧を信号として動作させているので, 電圧 信号に応じて電流を調整するドライバ回路が 必要になります. **図4**の光送信器の構成に示



すように、ドライバ回路の電気部分、LDの 光部分、それらをつなぐ接続配線などの実装 部分からなります. この動作について説明し ます. ドライバ回路において定電流源による 電流を分岐(シャント)してトランジスタ側 またはLD側に流せるようにします. ここで, 左側から高速な電気信号を電圧で入力する と、トランジスタがスイッチとなってオン・ オフ動作をします. 定電流源は一定の電流を 流し続けるので、トランジスタがオンになっ たときはトランジスタ側に電流が流れLD側 には電流が流れず発光しません。一方、トラ ンジスタがオフになったときはLD側に電流 が流れ発光します、このようにして、トラン ジスタのオン・オフによりLDの発光をオフ・ オンすることができます.

ドライバ回路に求められる要件は、高速・ 低消費電力・小型です。そのためにトランジ スタにCMOS技術を選択し、私たちのコア 技術である光-電子実装統合設計技術⁽⁴⁾を電 気回路に適用しました。図4の構成は電気部 分と光部分と実装部分からなりますが、従来 は個別に試作・評価して特性を合わせ込む必 要がありました。光-電子実装統合設計技術 では、光部分や実装部分を電気の等価回路に 置き換えたモデルを作成します。これをシ ミュレーションや設計ツールが進化した電気 回路の世界に取り込むことで、統合設計をし て性能予測を立てることが可能になります。

次に,小型実装構造について実際に作成し た構造(図5(a))を用いて説明します.電 気接続には,LDチップの表面にCMOSド ライバ回路チップの表面を重ねて搭載する手 法を用いました.これにより,チップ面積を 低減できるうえに,電気配線接続が短くなる ので寄生インダクタンス成分が減り高速信号 を通すことができるようになります.また, 光接続には,NTTのコア技術である平面光 波回路技術で培った技術を適用し,幅1ミリ のLDチップ端面に光ファイバアレイを直接 接続し,小型で低損失な光接続を可能としま した.

このようにして作成した光送信器の特性 を図5(b)に示します⁽⁵⁾. 25 Gbit/sのNBZ 信号の擬似ランダムビット列(7段)を4 チャネルからなる各チャネルに入力し合計 100 Gbit/sの送信信号としました. 挿入図 は1つのチャネルから出力された光信号のア イパターンで、アイ開口しており消光比 3 dB以上でした. 1.2 kmの標準シングル モードファイバを伝搬した後のビットエラー レートを評価した結果、4 チャネル同時駆動 時でも、エラーフリー伝送(ビットエラーレー ト $<10^{-12}$) することを確認しました、LDと ドライバ回路の合計の消費電力は267 mWで したので、電力効率は2.67 pJ/bitとなり送 信部として世界トップレベルの低消費電力を 実現しました.

LEAPレーザ

図1(b)で説明したように、ボード内、さ



図5 作成した光送信器

らにはチップ内の通信では消費エネルギーの 低減がより求められ、微小な活性層で動作す るLDが求められます.NTT では、この微 小LDを実現するために、フォトニック結晶 を用いたLDを開発しました⁽⁶⁾. 作製したレー ザの電子顕微鏡写真を図6に示します.フォ トニック結晶とは、屈折率が光の波長程度の 周期性を持つ人工的な周期構造です. この構 造により、中央部に非常に強く光を局在させ ることができます. 私たちは埋込再成長技術 を駆使し、InPフォトニック結晶中に埋め込 まれた活性層を有する構造の実現に成功しま した. このフォトニック結晶レーザを、その 特徴的な構造から、私たちは波長サイズ埋込 活性層フォトニック結晶 (LEAP: Lambdascale Embedded Active-region Photoniccrystal) レーザと呼んでいます.

作製したLEAPレーザの室温での注入電流-光出力特性を図7(a)に示します.この



図6 LEAPレーザの電子顕微鏡写真

ような微小なLDであっても室温連続発振が 実現でき、極めて小さいしきい値電流4.8 µA が得られました. バイアス電流25 µA時, 10 Gbit/sの NRZ信号による直接変調波形 を図7(b)に示します. このような微小電流 でも直接変調が可能で、LD単体として最小 の消費エネルギー4.4 fJ/bitが得られました.

本LEAPレーザは、前述したウエハ接合 技術と組み合わせることで、InP基板上だけ でなくSi基板上にも形成が可能です.この ようにフォトニック結晶を用いた微小LDで、





図8 演算処理回路と融合(チップ内のコア間光伝送)

将来チップ内のデータ転送にも適用可能な低 消費エネルギー動作を実証しました.

今後の展開

本稿で紹介したSi基板上の半導体レーザ は、Si光回路との高い集積性を備え、 CMOSドライバにより低消費電力で駆動で きることから、ボード内やチップ内といった 短距離光インターコネクションへの道筋を大 きく拓く成果と考えています。今後は、大容 量化と高密度集積化に挑戦し、さらには CPUやGPUといった演算処理回路との融 合を進め(図8)、将来の情報処理基盤の発 展に寄与できるように研究開発を進めていき ます.

■参考文献

- (1) https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf
- (2) T. Fujii, K. Takeda, N-P. Diamantopoulos, E. Kanno, K. Hasebe, H. Nishi, R. Nakao, T. Kakitsuka, and S. Matsuo : "Heterogeneously Integrated Membrane Lasers on Si Substrate for Low Operating Energy Optical Links," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 24. No. 1, 1500408, 2016.
- (3) H. Nishi, T. Fujii, N-P. Diamantopoulos, K. Takeda, E. Kanno, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, H. Fukuda, and S. Matsuo: "Monolithic Integration of an 8-channel Directly Modulated Membrane-laser Array and a SiN AWG Filter on Si," European Conference on Optical Communication, Paper Th3B.2, 2018.
- (4) 岸・長谷・小林・井田・栗島・野坂: "超低消費電力ア ナログ回路技術," NTT技術ジャーナル, Vol. 28, No. 11, pp. 21-24, 2016.

- (5) T. Kishi, H. Wakita, K. Shikama, M. Nagatasni, S. Kanazawa, T. Fujii, H. Nishi, H. Ishikawa, Y. Kawajiri, A. Aratake, H. Nosaka, H. Fukuda, and S. Matsuo: "A 25-Gbps x 4ch, Low-Power Compact Wire-Bond-Free 3D-Stacked Transmitter Module with 1.3- μ m LD-Array-on-Si for On-Board Optics," Optical Fiber Communication Conference, Paper Tu2l.1, 2019.
- (6) K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, H. Taniyama, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo: "Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photoniccrystal lasers," Nature Photonics, Vol. 7, pp. 569-575, 2013.



ナノフォトニクス技術による 光電融合アクセラレータへの研究展開

NTTナノフォトニクスセンタがめざす光電融合技術のターゲットは、低遅延・低消費エネルギーの光コンピューティング技術の創 生です。ナノフォトニクスによる小型の光機能素子の実現や、シリ コンフォトニクスによる大規模な光回路作製技術の進展によって、 多様な光情報処理が可能になりつつあります。本稿では、私たちが 研究している光パスゲート回路、光電変換素子、光非線形素子の各 技術について紹介し、これらを集積させることで可能となる「光電 融合アクセラレータ」への道筋を示します。



光電融合 ×光コンピューティンカ × フォトニッル語

NTT ケノフォト_-クスセンタ†† NTT 物性科学基礎研究所†2

光技術は「伝送」から「処理」へ

現代の光技術は、長距離の光ファイバ通信 やデータセンタ内でのサーバ間通信をはじめ とする大容量の情報伝送技術を牽引していま す。その延長線上ではさらに短距離スケール の光伝送技術が進展すると考えられますが、 その究極形はコンピュータチップの中での光 ネットワーク回路の構成、そして、光による 直接的な情報処理の実現です。 「光コンピュー タ | の実現はこれまでも光分野の研究者がめ ざす大きな目標の1つでしたが、CMOS電 子回路技術が台頭する世にあって、光を演算 処理に使う有意性を見出せずにきた歴史があ ります.しかし、CMOSの微細化と集積化 の限界(ムーアの終焉)が徐々に近づく中で, 光の高速性を利用した演算処理に対して期待 が高まっています(1)、それを後押ししている のは、ナノフォトニクスと呼ばれるような、 微細加工技術によって可能となる小型で省工

ネの光デバイス・回路技術の進歩です.また, 最近ではシリコンフォトニクス技術の発展が 強いシナジーをもたらし,光集積回路を小型 で大規模に実装できる環境が整ってきたこと で光コンピューティング研究の機運が高まっ ています.

ー概に光演算処理といっても、光回路上だ けで汎用性のあるさまざまな処理を行うこと は困難といえます.電子回路技術が持つ大容 量で並列なデジタル信号処理やメモリを組み 合わせ、光が得意な処理は光回路へ任せるこ とで特定の演算処理を加速させる、アクセラ レータとしての機能化が重要になると考えら れます⁽²⁾.特に、近年では、デジタル信号処 理に限らず、機械学習や高周波信号処理をは じめとするアナログ信号処理で光を利用する 価値が見直されており、CMOSエレクトロ ニクスとナノフォトニクスを連携させた光電 融合アクセラレータのかたちが少しずつ見え 始めています.



図1 光電融合アクセラレータの概要図

以降では、このような光電融合アクセラレー タの実現に向けて必要な3つのキーデバイス と考えられる「低遅延光パスゲート回路」「光 電変換素子」「光非線形素子」について紹介 します(図1).

低遅延光パスゲート回路

CMOS電子回路におけるムーアの法則(微細化と集積化による性能向上の経験則)の継続を阻むのは、トランジスタや金属配線における電気抵抗や電気容量による信号遅延や発熱の増加です。電子回路ではAND-OR-INVERT論理に代表されるように、論理ゲートを多段に接続することでデジタル論理演算が行われます。このとき、後段ゲートは前段ゲートが出力する信号の到来を待つため、演算の遅延時間はゲート段数に比例して拡大します。また、演算速度を上げるために信号のビットレートを高めると、金属内自由電子の運動の増加に伴い発熱が大きくなるため、低

消費電力が要求されるコンピューティング向 けCMOS電子回路の動作レートは一般に数 GHzに抑えられます. これらの理由から, さらなるCMOSの微細化・集積化によって, 演算処理量(スループット)は上げることは できても,演算遅延(レイテンシ)は頭打ち になっているのが現状です.

光パスゲート回路は、**図2**のように光の伝 送経路を切り替えるスイッチを連結させるこ とで構成されます.図の例では、電子回路か らの入力信号により、マッハ-ツェンダー干 渉型光スイッチ*が一括で操作され、これに より選択された経路を光が干渉しながら伝送 することで計算結果を出力します.これによ り、電子回路のような電気抵抗による電力損

^{*} マッハ-ツェンダー干渉型光スイッチ:光を分岐して、一方に 電圧を与えて導波路の屈折率変化を起こし、光の位相を変えま す.その後、互いに干渉させることで、光の出力経路を決める スイッチとなります(図2参照).出力比を0/1か1/0の2通りに 決める場合は光デジタル処理、出力比を0から1の間を連続的 にとる場合は光アナログ処理に該当します.



図2 光パスゲート回路の例

失や熱の発生がなく、演算自体は光の干渉で 行われるため、省エネかつ低遅延で処理する ことができます。例えば、デジタル信号("1" と"0"の2値をとる信号)の加算回路を考 えると、下位桁から上位桁への桁上げ計算が 遅延時間を律速する「クリティカルパス」に なりますが、このような処理に光パスゲート を活用することで、電子回路に比べて低遅延 化が期待できます⁽³⁾.その他の基本四則演算 も含めて、より複雑なデジタル演算にも応用 可能と考えられます(図2(a)).

デジタル処理だけでなく、アナログ処理(連続値で行う光処理)に光を利用する研究も進んでいます.無線通信で使われる高周波信号をいったん光に変換することで、高いスペクトル分解能や時間分解能を必要とする処理(フィルタリング,波形制御,分散制御など)

を光の領域で実施し、再び高周波信号として 出力するなど、光と無線の融合技術の進展が 期待されます⁽⁴⁾(図2(b)).また.深層学習を はじめとするAI(人工知能)技術の進展に 伴い、光ニューラルネットワークの研究が世 界的にも活発です. その中核にあるのはベク トル-行列積の計算ですが、CMOSデジタル 回路では計算遅延と消費電力がボトルネック になることが知られています。しかし、光干 渉を利用したパスゲート回路によって、高速 なアナログ信号によるベクトル-行列積を物 理実装できるため、これらの問題が解決され る期待があります⁽⁵⁾.後述するような光電変 換素子や光非線形素子を組み合わせて光電融 合ニューラルネットワークを構成し、光デー タを伝搬させることで低遅延な推論・判別を 実現できる可能性があります(図2(c)).

光電変換素子 (光と電子回路のインタフェース)

CMOS回路と光回路の融合に向けた大き な課題は、光変調器のような電気-光変換 (E-O変換)や、受光器のような光-電気変換 (O-E変換)を小型化・省エネ化し、高密度 な光-電子インタフェースを実現することで す.私たちは、フォトニック結晶と呼ばれる ナノ構造を用いて、この実現に取り組んでき ました(図3)、フォトニック結晶とは、半 導体などに形成した周期的なナノ構造体で す.ここでは薄板状の半導体に直径200 nm 程度の穴を周期的に形成しており、穴のレイ アウトによって、微小な光導波路や光共振器 を形成できます、NTTではこれまでに光ス イッチや光メモリ,レーザ光源など各種の機 能素子を実現し,記録的な低エネルギー動作 を実証してきました.図3(a),(b)のような光 変調器や受光器などの光電変換素子について も、フォトニック結晶を用いることで従来素 子よりも飛躍的に小型化・省エネ化すること ができました⁽⁶⁾.

光電変換素子では、電気容量(キャパシタ ンス、C)の低さが重要な指標になります. 図3(c)のように、CMOSトランジスタ単体 の電気容量が1フェムトファラド(fF)以下 程度であるのに対して、従来の光電変換素子 は一般に10 fF以上と大きく、これに比例す る高い消費エネルギーが必要であることが課 題でした.しかし、NTTの光電変換素子は 電気容量をCMOS素子と同等の1fF以下に



低減できます、このレベルの低容量化には大 きな意義があります.図3(d)に示すように. 一般的な光伝送系では、光電変換器の駆動電 力が大きく, 複数の増幅器によって信号を増 幅させる必要があるため、必要な消費エネル ギーや面積は大きくなります。しかし、低容 量な光電変換素子では、CMOS トランジス タの論理動作に必要な電荷量(電気的エネル ギー)をそのまま光電変換にも適用できるこ とから、増幅器を必要としないシームレスな 光電融合が可能です。そのため、送受信回路 もシンプルで省エネ効果が高く、CMOSチッ プ間やチップ内で高密度な光伝送系を構成す るのに適しており、また、その中で前述のよ うな光パスゲート処理を行うことも期待でき ます. 今後. 低容量性を維持したまま CMOSと光電変換素子を集積させる技術を 進展させ、コンピューティング応用に向けた 光電子インタフェースを実現していくことが 鍵になります。

光非線形素子(光トランジスタ)

トランジスタが行うような信号のスイッチ ングや増幅といった非線形的な操作は、光回 路においても重要な役割を持ちます.しかし、 光は干渉による線形的な信号操作が得意な反 面, 非線形的な信号操作のためには光と半導 体材料との非線形相互作用を必要とし、その ために高い光強度が必要という課題がありま した、そこで私たちは、前述したナノ受光器 とナノ光変調器を集積することでO-E-O型 の変換素子を作製し、小型で省エネの光非線 形素子を実現しました(図4).受光器に入 力された光信号が電流へ変換され、さらに負 荷抵抗(24 kΩ)を介して電圧信号へ変換さ れます。この電圧信号が光変調器を駆動する ことにより、別の光に信号波形が転写されま す. これによって10 Gbit/s光信号の非線形 な転送動作が実現されました. この動作で は、受光器への光入力強度よりも光変調器か らの光出力強度を2倍以上高められました. すなわち、電気トランジスタに信号利得があ

(a) 素子の写真



(b) 光信号転送の動作原理

図4 光非線形素子(光トランジスタ)

るのと同様に、光に対して信号利得が得られる「光トランジスタ」を実現できたといえます⁽⁷⁾.

この集積素子での電気容量は2fFと極め て小さく、このように低容量性を維持した光 電融合は世界初といえます.従来のO-E-O 変換素子は電気容量が大きいために省エネ化 は本質的に困難でしたが、私たちの低容量素 子によって、消費エネルギーもビット当り数 fJレベルと従来の100分の1以下に低減され ました.また、光信号利得があることで、多 段に光信号を転送することも可能と考えられ ます.これにより、光パスゲート回路どうし を接続して大規模化させることが可能になり ます.また、図2で示したように、光ニュー ラルネットワークにおける非線形素子(光 ニューロン)として使うなど、今後、光処理 への適用範囲が拡大していくと考えられます.

最後に

光が持つ優位性を最大化し、電子回路を凌 駕する性能を得るために検討すべき点はたく さんあります.光の情報を波長・空間・時間 で多重化し、光処理の次元を増加できること は電子処理に対する強いメリットになりま す.また、光電変換やアナログ-デジタル変 換,電子回路中での遅延やエネルギー効率を 含めたコ・デザインや、アプロキシメート・ コンピューティングといった近似的な計算手 法によって精度と計算コストをバランス化さ せる設計なども重要になります⁽⁸⁾.本稿で紹 介したような要素技術(コンポーネントレベ ル)の研究を超えて、より大局的な視点(アー キテクチャレベル)で考えることが、具体的 な光電融合型コンピューティングのかたちを 見出すために必要と考えられます.

■参考文献

- 納富・寒川:"オンチップ光集積に向けたナノフォトニクス 技術,"NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 5, pp. 6-10, 2018.
- (2) K. Kitayama, M. Notomi, M. Naruse, K. Inoue, S. Kawakami, and A. Uchida : "Novel frontier of photonics for data processing—Photonic accelerator," APL Photonics, Vol. 4, No. 9, 090901, 2019.
- (3) 新家・石原・井上・野崎・納富: "光パスゲート論理に基づく超低遅延光回路," NTT技術ジャーナル, Vol. 30, No. 5, pp. 28-31, 2018.
- (4) D. Perez, I. Gasulla, and J. Capmany: "Programmable multifunctional integrated nanophotonics," Nanophotonics Vol. 7, No. 8, pp. 1351-1371, 2018.
- (5) Y.C. Shen, N.C. Harris, S. Skirlo, M. Prabhu, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, X. Sun, S.J. Zhao, H. Larochelle, D. Englund, and M. Soljacic: "Deep learning with coherent nanophotonic circuits," Nature Photonics, Vol. 11, pp. 441-446, 2017.
- (6) 野崎・松尾・藤井・武田・倉持・新家・納富:"フォト ニック結晶による低キャパシタンス光電変換素子,"NTT技 術ジャーナル, Vol. 30, No. 5, pp. 11-14, 2018.
- (7) K. Nozaki, S. Matsuo, T. Fujii, K. Takeda, A. Shinya, E. Kuramochi, and M. Notomi: "Femtofarad optoelectronic integration demonstrating energy-saving signal conversion and nonlinear functions," Nature Photonics, Vol. 13, pp. 454-459, 2019.
- (8) 川上・谷本・北・新家・小野・納富・井上:"光アプロ キシメートコンピューティングの実現に向けた電力性能解 析,"情報処理学会研究報告,2019-ARC-237, pp. 1-8, 2019.



(左から)野崎 謙悟/新家 昭彦/ 納富 雅也

これまで「光による情報伝送,電子による情報 処理」という役割であった世界が変わりつつあり ます.ナノフォトニクス技術によってどんな光電 融合処理が実現されていくのか,今後も注目して ください.

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所 量子光物性研究部 フォトニックナノ構造研究グループ TEL 046-240-4537 FAX 046-240-4305 E-mail kengo.nozaki.fd @ hco.ntt.co.jp