

4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

4 *Research on Dedicated Moderate Range Communications*

4-1 光電子融合プラットフォーム

4-1 *Optical/Electrical Convergence Platform*

松本 敦 山本直克

Atsushi MATSUMOTO and Naokatsu YAMAMOTO

アクセスネットワークは身近な情報通信を支える重要なインフラであると同時に、そこで培われた情報通信技術はデータセンタ内の高速・大容量のハイエンド通信技術となり得る重要な領域である。多様なアクセスネットワークの利用シーンを想定したとき、有線と無線がシームレスに接続、利用されることが考えられることから、デバイスレベルでの光・電子融合技術やシステムレベルでの光・高周波融合技術など、光技術と電子技術を高度に融合することが将来のアクセスネットワークを支える基盤技術となり得る。本稿では、光電子融合プラットフォームとして、将来のアクセスネットワークにおける光と電子技術の融合の方向性と、その一例としてヘテロジニアス集積技術を用いた $1\ \mu\text{m}$, $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の単一モード波長可変ヘテロジニアス量子ドットレーザ、光電子融合デバイスとして二波長発振レーザデバイスについて示す。

Access networks is not only an important infrastructure, which supports our communications, but also the information and communication technology (ICT) which will be advanced in such networks should be indispensable one, which could become high speed and large capacity high-end ICT in the data center. The highly fusing photonics and electronics, such as the convergence of optical and electronic technology in devices and optical and high frequency in systems, should become fundamental technology that supports future access networks because it will be necessary that the wired and wireless need to be seamlessly connected and used taking the usage scenes of various access networks into accounts. In this paper, we indicate the trends of the fusion between photonics and electronics in the future advanced access networks as a convergence of optical and electrical platform, and as an example, we also indicate the recent works of $1\ \mu\text{m}$ and $1.3\ \mu\text{m}$ band single mode tunable heterogeneous quantum dot laser and dual mode oscillation quantum dot laser as a device of optical and electrical convergence, which are both utilized heterogeneous integration technology.

1 まえがき

IoT (Internet of Things) や複合現実 (Mixed Reality: MR) などは次世代の社会インフラとして注目され、それを実現するためにはコア網からアクセス網を含めたネットワーク全体の大容量化やフレキシビリティ向上などの高機能性を達成するネットワーク基盤技術が重要となる。特に、より身近な通信である中短距離のアクセス系ネットワークなどでは高速・大容量通信を確保しつつ、高い可動性も注目されることから、光を媒体とする大容量な有線ネットワークと、ミリ波やテラヘルツ波等の高周波を用いた無線ネットワークを

シームレスに接続・融合するための情報通信基盤技術が必要となる。

光と電子(特に高周波)を高度に融合することを可能とする革新的なデバイス技術と、それを活用したシステム基盤技術の研究開発が重要となる。情報通信研究機構(NICT)では、小型なチップ内で光と高周波を高度に融合することを可能とする機能集積デバイス技術を「パラレルフォトンクス基盤技術」として、また光と高周波を高度に融合することで100 Gbps 超級の有線・無線シームレス伝送を目指す技術を「100 G アクセス基盤技術」として研究が推進されている。

2 アクセスネットワークにおける光・電子融合プラットフォームの重要性

IoT では身の回りの多くの情報通信端末やデバイスが相互に通信、融合することで高度で快適な生活環境が実現できると期待されている。情報通信端末・デバイスの増加、大容量化、高度化は更に急速に進展し、アクセス網では図1に示すような多様なネットワーク構成を生み出すことが可能となる。FTTxに代表されるような家庭や職場での大容量通信はもちろん、データセンター内のハイエンドネットワーク、IoT 基盤を支える環境情報収集のためのセンサネットワークなど、多岐にわたるが、特にスマートフォンや小型情報通信端末の発展に伴い、有線と無線をシームレスに接続する大容量通信の需要が高まりつつある。

次世代の無線通信の大容量化を実現する技術として5 GやBeyond 5 Gが注目されている。特に、2020年に端を発すると期待される5 G時代には現在の10～100倍

程度である20 Gbps級の大容量情報通信が検討されている。さらに、その先のBeyond 5 Gでは100 Gbps超級の情報通信の実現が期待されている。このような無線の大容量化を支えるためには、図2に示すような、アクセスネットワークでの光・無線融合がキー技術となる。従来使用されているマイクロ波等の電波は、少ないアンテナ数で広域をカバーすることが可能であり、これにより音声通話を中心とするネットワークが構成されてきた。一方、未来では情報コンテンツの主流は音声から写真や動画、さらには拡張現実(Augmented Reality: AR)や複合現実(Mixed Reality: MR)のためのARやMR、3D、4Dコンテンツなど大容量化が急速に進展すると考えられ、従来の周波数帯域を使った無線通信技術ではカバーできなくなると懸念されている(図2)。そのため、周波数帯域は従来のマイクロ波からより高い周波数(数十～数百GHz)、さらにはTHz帯域まで、利用が拡張されると考えられる。これはキャリア周波数の増加により、利用できる周波数帯域の大幅増加が期待でき、10 Gbpsや100 Gbpsなどの大容量無線通信が達成できるためである。

実際、5 Gに関しては3 GPP等の標準化の中で、20～80 GHz帯域の各国での利用が検討されている。しかし、一般にキャリア周波数の高周波化に伴い、大気減衰をはじめとする様々な電波の減衰の影響を受けることが知られており、可能な限り高周波無線のエリアを小さくするスモールセル化が検討されている。例えば、数百m程度のカバーエリアを有するマイクロセルからピコセル、さらには数m～10m程度のフェムトセルへとセルの小型化が議論されている。このことより、図2に示すように、より身近なところまで光ネットワークで大容量の情報を伝送し、そこから受信端末

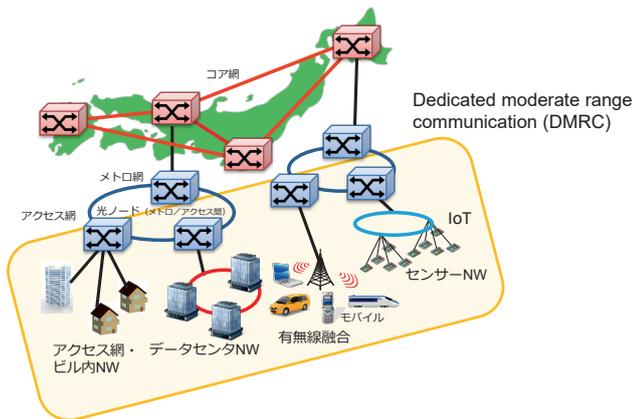


図1 アクセスネットワークにおける多様な情報通信ネットワーク利用



図2 情報通信における光電子融合プラットフォームの将来像

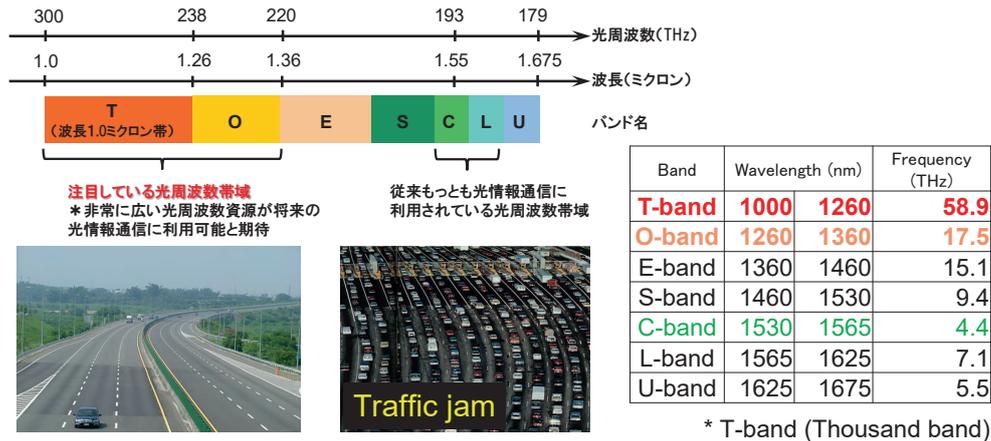


図3 光ファイバ通信で利用される光周波数帯域

直近では高周波無線通信を利用した大容量シームレス伝送をすることが将来像として描ける。また、家庭内やビル内、さらには列車、車、ロボットなど無線の先にある小エリア内での情報通信ネットワークの光化として Photonic Local area network (Photonic LAN) も考えられる。このため、アクセスネットワークの中での光電子融合プラットフォームの技術として、光から無線さらに光へと、情報媒体に依存しないシームレスな情報通信基盤技術の開発が重要となる。

光情報通信技術はアクセスネットワークの高度化とコミュニケーション多様化、さらに、前述のような大容量な無線信号の収容など重要なインフラ技術である。光情報通信ネットワークの更なる大容量化とフレキシビリティ向上を目的とし、世界各国でデータ伝送速度の高速化や波長・偏波・空間多重、新規変調フォーマット利用など様々なアプローチでその技術開発の高度化が盛んに推進されている。このような背景の中、NICT では光周波数帯域を有限の資源としてとらえ、光周波数資源の開拓に着目し、新しい光周波数帯域を光データ伝送に利活用するための基盤技術の研究・開発を進めている。図3に光通信で利用される波長帯域(光周波数帯域)の割当状況について示す。

従来、光情報通信ネットワークではITU-T 勧告に基づく C-band (1.53-1.57 μm) と L-band (1.57-1.63 μm) が積極的に利用されている。この主な理由として①波長 1.55 μm 近傍でシリカ系光ファイバのロスが最も低いこと、②エルビウム添加ファイバ光増幅器(Er-doped fiber optical amplifier: EDFA)による光信号の増幅及びデータの中継が可能であること、③半導体を中心とする光 ICT (Information and Communications Technology) デバイスが充実していること、などが考えられる。一方で、もし PtoP の光伝送システムを構成するためのこれら伝送路や増幅器、デバイス群に関する基盤技術が、他の波長帯域でも同様に成立することが

できれば、その波長帯域は新たな光情報通信のための帯域として有効に利活用できる。この考察の下、近赤外の波長帯域を俯瞰すると、新たな帯域として波長 1.0 ~ 1.3 μm 帯域 (1.00-1.26 μm ; Thousand-band: T-band 及び 1.26-1.32 μm ; Original-band: O-band) が注目される。

現在、最もよく使われている C-band は約 4.4 THz 帯域であるが、これは 50 GHz チャンネルグリッド時に 88 チャンネル相当である。対して T+O band の光周波数帯域では 1,000 を超えるチャンネル数を確保できることから、将来の大幅な光チャンネル数の確保が期待される。この T+O band の波長帯域では、シリカ系またはプラスチック系光ファイバが充実しており、さらにこの波長帯域をカバーするイットリビウム添加ファイバ光増幅器 (Yb-doped fiber optical amplifier: YDFA) やプラジオセム添加ファイバ光増幅器 (Pr-doped fiber optical amplifier: PDFA) などの高効率光ファイバ増幅器も存在する。また、この T+O band で動作する超広帯域光通信デバイスとして半導体光デバイスのほか、近年では半導体量子ドット技術を用いた超広帯域レーザー光源や半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier: SOA) が実現されつつある。

C-band に比較して T+O band は光ファイバ伝送ロスがわずかに高いことは知られているが、数 m から 20 km 程度のアクセスネットワークではその伝送損失以上に、T+O band を利用した、光周波数帯域に制限されないフレキシブルな情報通信ネットワーク構築等のメリットがあると期待される。

以上のように、アクセスネットワークによる光・電子融合プラットフォームでは、光通信と無線通信をシームレスに接続し、可能な限り早く信号を光網に収容する技術や、無線の高周波化による大容量通信技術の実現、さらに新たな周波数帯域(波長帯域)を積極

4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

的に活用した自由度の高い光ネットワーク技術の確立、これらがキー技術として考えられる。

3 情報通信研究機構における光・電子融合プラットフォーム技術の開発

光・電子融合プラットフォーム技術を実現するためには、デバイスとシステムの両方を俯瞰した研究開発が重要である。NICTではこの視点に立ち、光電子融合デバイス技術を「**パラレルフォトニクス技術**」として、また光・無線の大容量シームレス接続技術を「**100 G アクセス技術**」と称して研究開発を推進している。図4は研究プロジェクトの全体像である。パラレルフォトニクス技術では高精度並列光送受信・スイッチング技術や、超小型、高速・高精度送受信デバイス技術を中心に研究開発を実施している。特に高速で並列に信号の送受信を行うときには、個々のデバイスの高速化・高精度化はもちろんのこと、パラレルに配列されたデバイス間のクロストークが問題となることから、多重化に伴うクロストークの抑制技術にも注目し研究を実施している。一方、100 G アクセス技術では、先述のとおり有線と無線を両用し、それらをシームレスで接続するためのモバイルバックホール・フロントホール技術の研究を実施し、100 GHz級のミリ波帯やテラヘルツ帯を利用した100 Gbps級の大容量光・無線シームレス接続を目指して研究開発を実施している。また、100 G アクセス技術の中では、光と無線を横断的に伝送される「**波形**」の重要性に注目した高速波形転送技術（Sensor on fiber技術）も実施している。これは、伝送に用いる送受信器、中継器、伝送線路等の

デバイスやサブシステムに関して、そのリニアリティを極限まで高めることを中心にしたデバイス・システム研究である。この高速波形転送技術は、将来の高感度レーダや光と電波をシームレスに接続する際のスプリアス抑制、さらに低遅延伝送など、情報通信の高精度化等に重要な技術となる。

この研究方向性に沿って創出された研究成果の一例を図5に示す。デバイス開発を目指したパラレルフォトニクス技術の研究開発では、図に示すような非常に小型・高密度な光電子集積デバイス技術として、DCから100 GHz以上の高い周波数の光・高周波変換を実現する半導体デバイス技術の開発に成功している。また、ナノテクノロジーのひとつである半導体量子ドット技術と、複数の異種機能材料を組み合わせるヘテロジニアス光集積デバイス技術を確立することで、情報通信用の超広帯域・超小型波長可変レーザデバイス技術を確立している。一方、システム視点の100 G アクセス技術では、ミリ波・テラヘルツ波を用いた大容量光・無線シームレス通信技術として光ファイバ無線技術の開発や、空港滑走路の異物を高速に検知する空港滑走路監視レーダシステム、さらに高速鉄道用通信システムを実現するためのシステム基盤技術の確立に成功している。これらの技術の詳細については、本章以降に掲載される。

以上、多様な利用シーンが想定されるアクセスネットワークにおける情報通信高度化の重要性とその将来に向けた取組の方向性について俯瞰した。電磁的な情報通信のためには光、無線ともに周波数資源の開拓が重要であり、無線の高周波化や、光通信の新規は超帯域開拓について示した。アクセスネットワークではデ

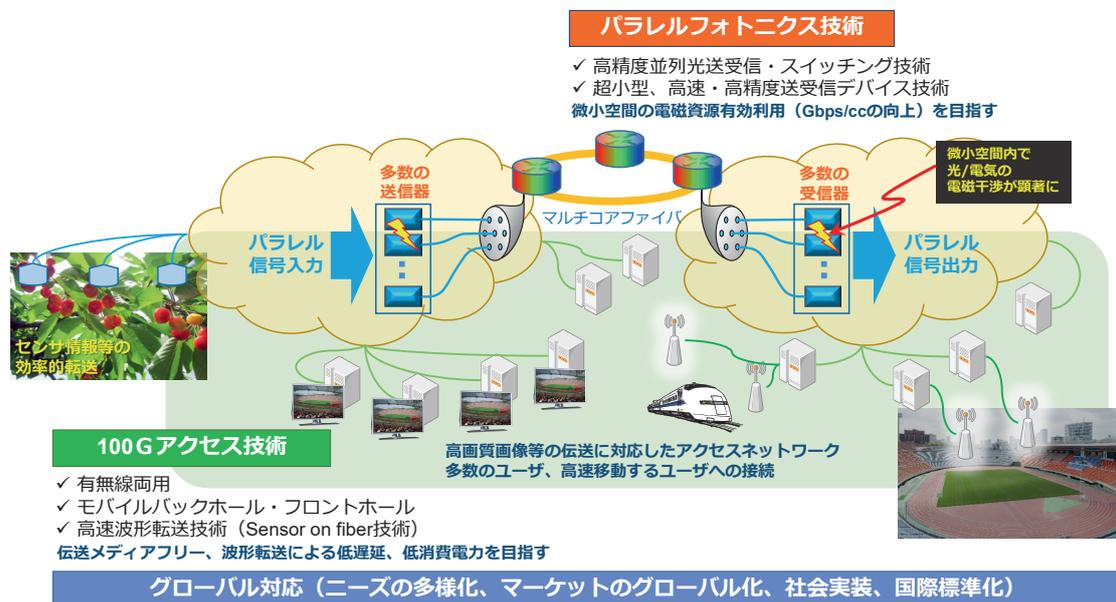
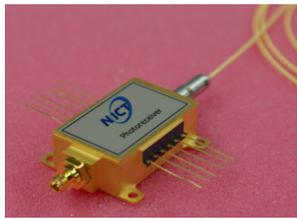
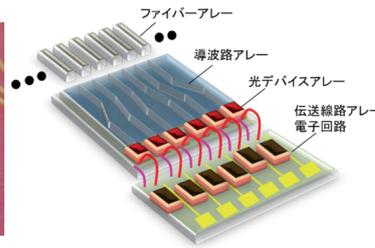


図4 NICTにおけるアクセスネットワーク基盤技術の研究開発

デバイス研究：パラレルフォトニクス技術



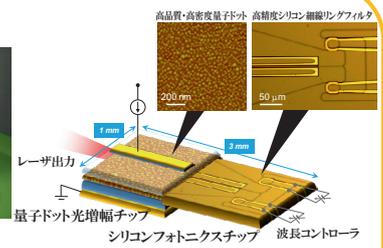
光・高周波融合デバイス技術



高密度光電子集積技術

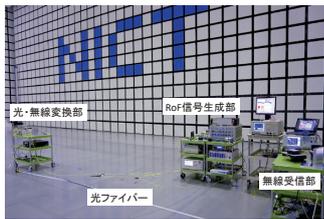


広帯域光デバイス技術
新規帯域量子ドット技術

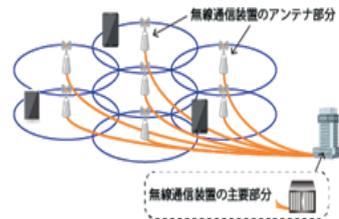


ヘテロジニアス・デバイス技術

システム研究：100Gアクセス技術



有無線融合通信技術



スモールセル化と光ファイバ無線



空港滑走路監視システム

高速鉄道用通信システム

図5 将来のアクセスネットワークを支えるためのパラレルフォトニクスと100Gアクセスに沿ったデバイス・システム技術

デバイス技術とシステム技術がより密接して連携し、さらに光通信、無線通信の隔たりが曖昧となる。そのため光電子融合プラットフォームという発想のもので、光・電子融合デバイスの開発や、有線・無線のシームレス伝送システムに関する研究を推進し、将来の自由度の高いアクセスネットワーク実現の基盤技術の開発が重要となる。

4 異種機能材料（ヘテロジニアス）集積技術

上述したように、これまでに NICT では複数の異種機能材料を組み合わせるヘテロジニアス光集積デバイス技術を確立してきた [1][2]。近年の情報通信に関する社会的な状況を踏まえ、世界の研究動向に目を向けると、現在世界中で注目され盛んに研究されている技術として、Si フォトニクス技術を用いた超微細な光集積回路 (PICs: Photonic Integrated Circuits) と、Ⅲ-V 族化合物半導体を用いたレーザなどの発光素子を異種材料集積 (ヘテロジニアス集積) する技術がある [3]-[5]。Si フォトニクスによる PICs は LSI の微細配線に用いられる CMOS ラインと相互互換性が高く、極めて効率良く低コスト化が可能であると考えられ、また LSI との集積を可能し、そしてその高い屈折率差を有するデバイス構造から光回路を超微細化できるという特徴を持つため、超小型・低消費電力化、電気・

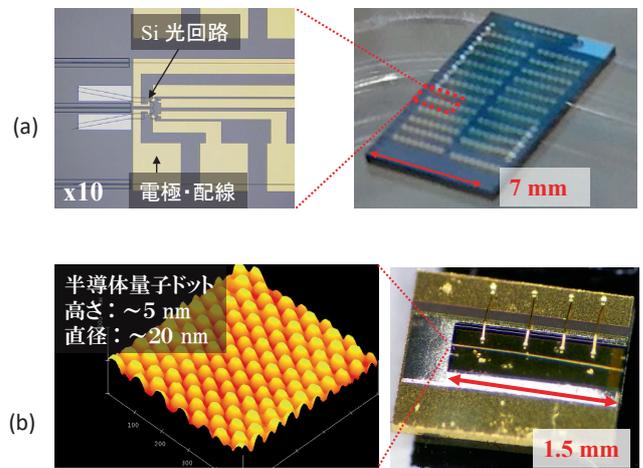


図6 Si フォトニクス光集積回路 (a) と量子ドット光デバイス (b) の例

光通信の融合が可能となるという点で世界的に非常に重要な研究課題と認識されている。図6 (a) に我々が試作した Si フォトニクス技術を用いた PICs の概観写真とその顕微鏡写真に関して典型的な例を示す。このチップの中に約 200 以上の光要素素子が集積されている。しかしながら Si は間接遷移型の半導体のため発光効率が非常に悪く、発光素子を PICs に集積するためにⅢ-V 族化合物半導体を用いたレーザなどの発光素子をヘテロジニアス集積することが非常に重要となる。一方、我々は量子ドット (QD: Quantum dot) 構造

4 アクセネットワークの大容量化を目指す研究開発

作製技術を確立し、その QD 構造を用いた高性能な光デバイスの数々をこれまで実証してきた [6]-[11]。図 6 (b) に QD 構造を用いた半導体レーザと AFM (Atomic Force Microscope) による QD の観察画像を示す。この図に示したように QD は直径 ~ 20 nm、高さ ~ 5 nm の非常に小さな微粒子構造で、その大きさや歪み、形状などを原子レベルで制御することで発光波長や電子準位などの光・電子物性を任意にコントロール可能である。先端 ICT デバイスラボに整備されている分子線エピタキシー装置を用い、世界にも類を見ない NICT 独自の高密度・高品質 QD の形成技術である。この技術による QD を用いた半導体レーザ (QD-LD: Quantum Dot Laser Diode) は、レーザ発振閾値や効率が温度に対してほとんどぶれない性質を持っている [12][13]。図 7 に 30 層積層した QD 構造を用いた QD-LD の光出力特性の温度依存性の一例を示す。この図に示したように 15 ~ 80 °C までの温度範囲にお

いて発振閾値電流がほぼ変化しない特性が得られている。温度安定性の指標である特性温度 T_0 は ~ 40 °C までの温度範囲で $T_0 = 3240$ K という値であり、これは世界最高水準の特性である (T_0 は値が高いほど閾値の温度安定性が高いことを示し、一般的な 1.55 μm 帯の半導体レーザの T_0 の値は 100 K 前後である)。また、図 8 には QD-LD のレーザ発振スペクトルの温度依存性を示す。発振スペクトルに関して発振波長の温度変化は非常に小さく、一般的なファブリペロー構造の LD の発振波長の温度シフト $d\lambda/dT$ が 0.8 nm/K 前後であると言われていたのに対し、この QD-LD では $d\lambda/dT = 0.11 \sim 0.15$ nm/K であり、非常に温度安定性が高いことを示してきた。材料の性能を根本的に引き上げる QD 技術を用いることで、光電子デバイスの飛躍的な高性能化が期待される。

前節でも述べたように、NICT ではこれまでに T+O band といった新規波長帯の光デバイスに関して研究開発を行ってきたが、以上に示したような QD 光デバイス技術と Si フォトニクスによる PICs をヘテロジニアス集積したレーザを作製し、コンパクトな波長可変光源を実証してきた [1][2]。図 5 (上段、右図) に示したヘテロジニアス波長可変レーザのレーザ発振特性と波長可変特性を図 9、図 10 にそれぞれ示す。特に T-band 対応の波長可変光源に関して、一般的に Si には 1 μm 帯に光吸収があるということがよく知られているため、今までこの波長帯での Si フォトニクスの研究はあまり行われてこなかった。しかしながら、我々はこの波長帯における Si チャネル光導波路の導波損失が ~ 3 dB/cm 程度と O-band での導波損失と比べ、それほど高くないことを見だし、この図に示したように 1 μm 帯において、Si フォトニクスによる外部共振器フィルタを用いたヘテロジニアス集積波長

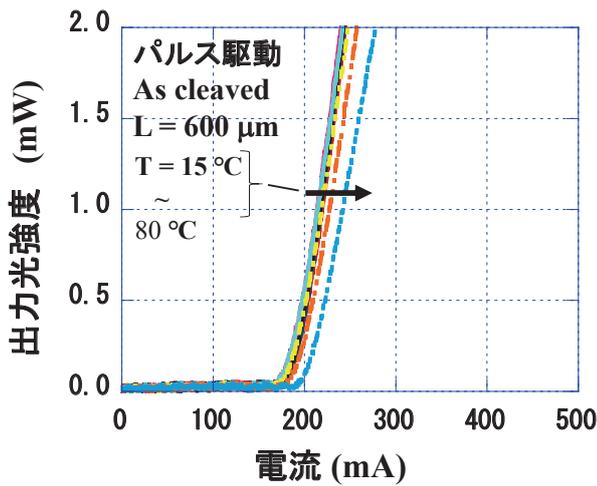


図7 量子ドットレーザの出力特性の温度依存性

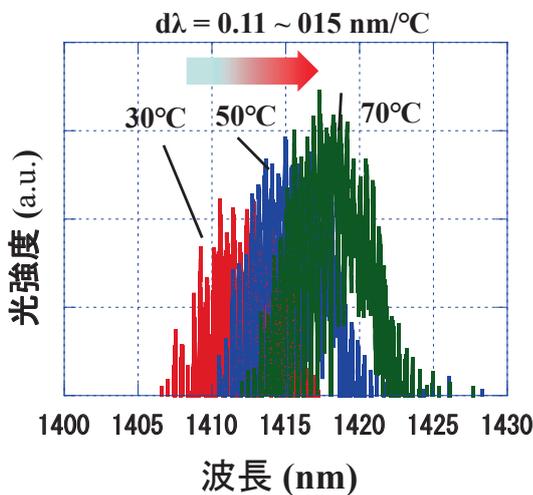


図8 量子ドットレーザの発振波長の温度依存性

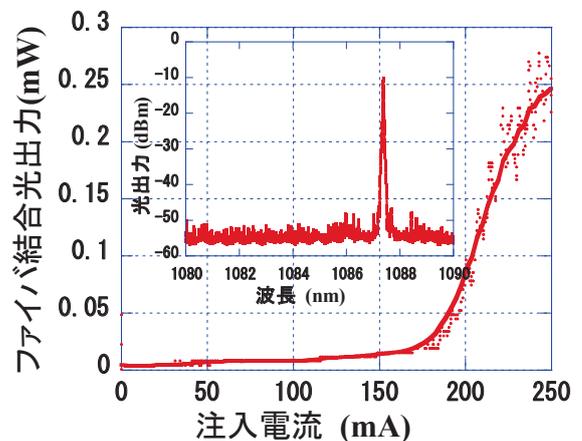


図9 1 μm 帯のヘテロジニアス量子ドット波長可変レーザの発振特性と典型的な発振スペクトル

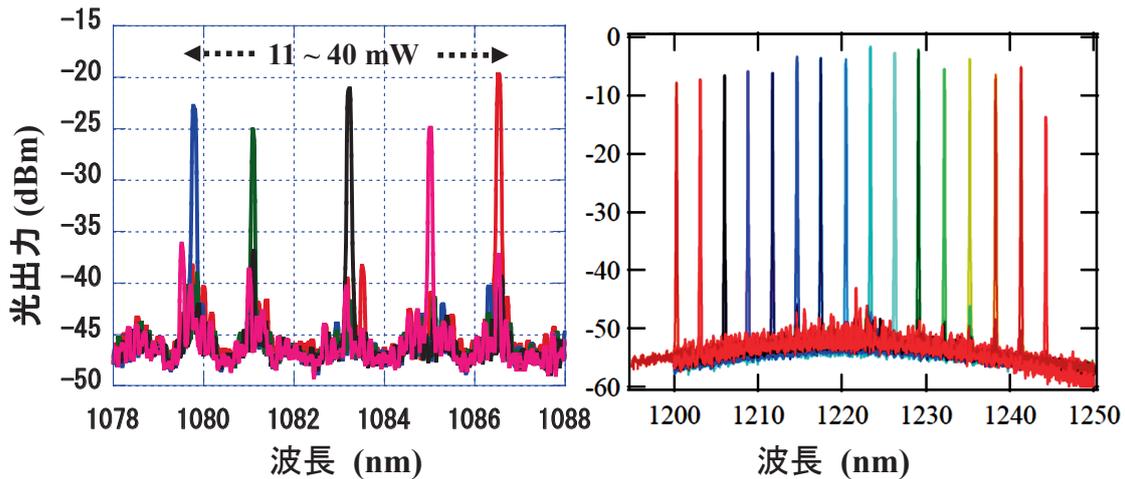


図 10 1 ~ 1.3 μm 帯のヘテロジニアス量子ドット波長可変レーザの波長可変特性

可変 QD レーザを初めて実証した [13]。このヘテロジニアス波長可変 QD レーザのサイズは約 $1 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$ 程度であり、特に従来の $1 \mu\text{m}$ 帯の波長可変レーザでは、外部フィルタ・回折格子・ミラー等により装置構成が大型化する傾向があったため、このように非常にコンパクトな光源で実現できることによるメリットは大きい。Si フォトニクスチップは波長可変フィルタの機能を持ち、2つのリング共振器とスポットサイズ変換器を集積している。このリング共振器において、表面に装荷されたマイクロヒータに電力を印加することにより Si 光導波路の屈折率を TO (Thermal Optics) 効果により変調させることである任意の波長を選択し、その光を QD 利得チップにフィードバックさせることにより単一モード発振と波長可変特性を得られるようにしている。閾値電流は 180 mA 程度であり、また波長可変特性としては、 $1,080 \text{ nm}$ 前後、 $1,200 \sim 1,250 \text{ nm}$ における T+O band でそれぞれヒータ電力を制御することにより任意の波長でレーザ発振させることが可能であることを示した。

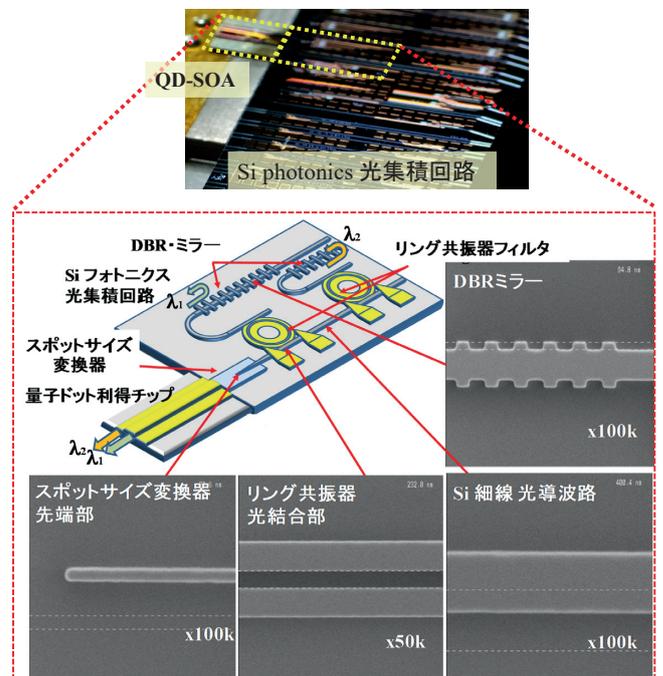


図 11 量子ドット利得チップと Si フォトニクス光集積回路をヘテロジニアス集積した 2 波長レーザの概観写真 (上段) と集積した各光素子の典型的な SEM 画像 (下段)

5 小型高密度集積光電子融合デバイス技術

次に、ヘテロジニアス集積技術を用いた小型高密度集積・光電子融合デバイス技術について述べる。ここでは光電子融合デバイスの一例として、2 波長発振レーザによる差周波可変ミリ波・テラヘルツ波生成デバイスを示す。前節までに述べたように、光ファイバ無線 (RoF : Radio on Fiber) 技術を利用し、光・無線リンク間において信号波形をシームレスに転送させ高速・大容量に通信する際、デバイス技術の観点から重要な要素技術としては光 2 波長生成技術と超高速なフォトディテクタ (PD : Photo detector) であると考えられる。この信号転送技術のポイントは、例えば～

100 GHz 程度のミリ波の周波数で離調された 2 つの波長の光信号を生成し、その信号を光ファイバ中に伝送させた後、超高速動作が可能な PD (例えば UTC-PD: Uni-Traveling Carrier PD [14]) で受信し、包絡線検波を行い光電気変換を行うとその離調した周波数の電波を放射させることが可能ということである。一般的な 2 波長光信号の生成方法は、外部から単一モードのレーザ光を LN (LiNbO_3) 変調器に入射し、変調 Side band をミリ波の周波数に合わせ、中心波長 (入射光の波長) を光フィルタで取り除くことで生成することができる。この方法では非常に精密で安定した 2 波長光信号を生成することができる点が大きなメリットであ

4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

るが、素子が大きく、非常に高価な点が難点である [15]。しかしながら、2波長光信号生成技術を用いたネットワークの応用や高機能化、コストなどを念頭に

入れた場合、非常に小型・低コスト、低消費電力でミリ波を生成することが可能な差周波可変型の2波長信号生成素子の研究開発が期待される。図11はQD利得チップ(QD-SOA: Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier)とSiフォトニクスPICsをヘテロジニアス集積した2波長発振レーザの概観写真(上段)と集積した各光素子の典型的なSEM画像(下段)を示したものである。SiフォトニクスPICには1つのスポットサイズ変換器と同じ設計の2セットのリング共振器フィルタとDBR(Distributed Bragg Reflector)ミラーが集積されている。Si細線光導波路は幅400nm、厚み220nmであり、スポットサイズ変換器の領域では幅400nmから先端の80nmのテーパ構造になっている。リング共振器の共振器長と光結合係数はそれぞれ95 μ m、0.4程度であり、FSR(Free Spectral Range)は約3.2nmである。またDBRミラーの長さ、凹凸の深さはそれぞれ、1mm、10nm、反射中心波長は1,233nmとし、半値幅は3.3nmと設計した。この2波長発振レーザの動作原理としては、まずリング共振器からFSRの波長間隔で透過してきた光のうち、DBRミラーの反射帯域内にある1つの波長のみが選択的に反射され、QD利得チップの方にフィードバックされる。もう一方のリング共振器において、ヒータによる加熱を行うと屈折率が変化することでリング共振器を透過する波長が少しずれることになる。これにより2つの波長が反射されQD利得チップにフィードバックされることになる。一方、QDは

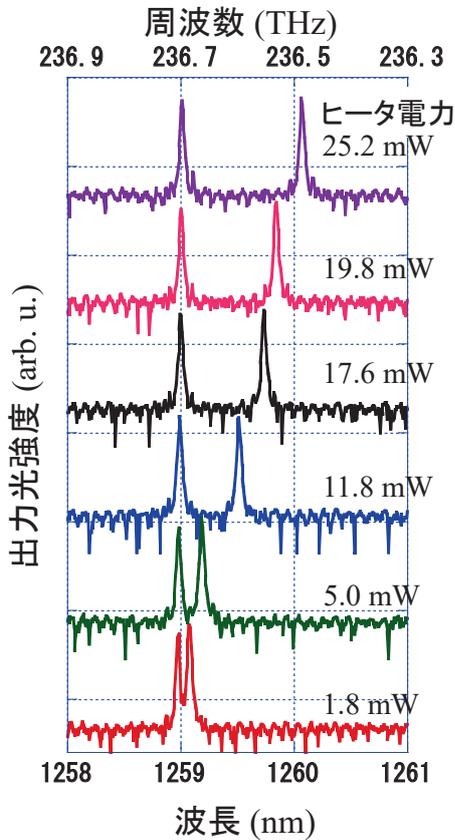


図12 2波長発振状態のスペクトルとヒータに電力を印加した際における2波長の離調特性

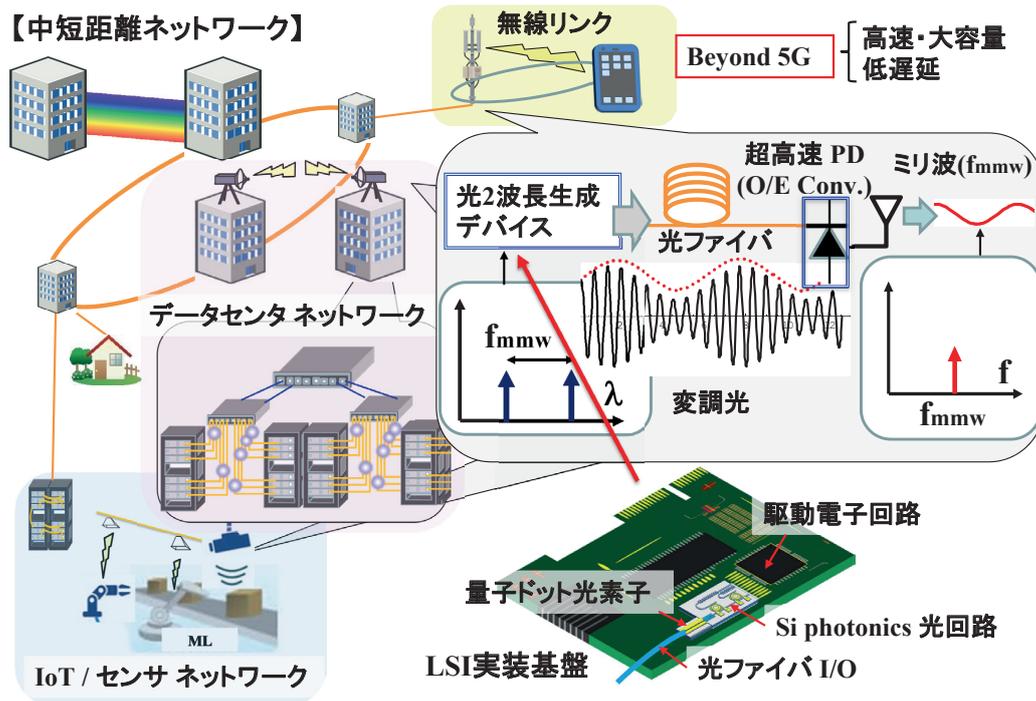


図13 小型高密度集積光電子融合デバイス技術を利用した将来のアクセスネットワークの概念図

空間的に分離されているため個々のドット内に注入された電子・正孔はお互いに影響を与えことなくほぼ独立に振る舞う。これによって複数の波長を同時に発生させる光源を1つの量子ドットチップで実現できるようになる [16]。このような複数波長を同時かつ安定に発生することは従来の技術では困難であったが、この特徴を活かすことで、2波長発振レーザがこのヘテロジニアス集積 QD レーザにより実現されることとなる。図 12 は 2 波長発振スペクトルでリング共振器上のマイクロヒータに電力を印加した際の離調特性を示したものである。図に示したとおり、良好な 2 波長発振動作を実証することができた。このときの差周波はヒータ電力約 2 ~ 25 mW で、約 20 ~ 200 GHz であった。また、TO 効果を用いているため、2つの発振波長の離調周波数は連続的に変化・制御させることが可能である。今後はさらに発振線幅の低減、差周波間隔・2波長ピークレベルの安定化や、アレイ集積化による多チャンネル化、変調器や光機能素子の集積などにより、更なる高機能化が期待される。

以上、ヘテロジニアス集積 2 波長発振 QD レーザは非常に小型で多チャンネル化、低コスト化が期待でき、また QD の特性としての温度安定に非常に高いという点から駆動電子回路や信号処理用 LSI 等の各種電子回路との実装した場合もその発生する熱の影響を受けにくいと考えられ、その潜在的な特性の高さが期待できる。図 13 に本技術の期待される将来像を示した。ミリ波・テラヘルツ波生成素子として特に生産ライン等における IoT・センサネットワークでは非常に多くのデバイスが必要とされ、高速・大容量、低コストとともに熱特性の高さも重要であると考えられるため、このようなところに本技術が適用されるのではないかと考えられる。また、5G の先と位置付けられている Beyond 5G の無線リンクにおける無線基地局や、データセンタネットワークにおける建屋間、ラック間的高速無線通信等にも応用されるのではないかと期待される。

6 まとめ

本稿では、光電子融合プラットフォームとして、将来のアクセスネットワークにおける光と電子技術の融合の方向性と、その一例としてヘテロジニアスデバイス技術による 2 波長発振 QD レーザについてその良好な特性を示した。今後、Si フォトニクス PICs や QD 光デバイスのヘテロジニアス集積技術により、更に高機能な小型高密度集積・光電子融合デバイスを用いることで、高速・大容量なアクセスネットワークの実現が期待される。

謝辞

本研究の一部は総務省の「電波資源拡大のための研究開発による委託研究」により実施されたものである。

【参考文献】

- 1 T. Kita, N. Yamamoto, A. Matsumoto, T. Kawanishi, and H. Yamada, "Heterogeneous quantum dot/silicon photonics-based wavelength-tunable laser diode with a 44 nm wavelength-tuning range," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.55, p.04EH11, 2016.
- 2 T. Kita, N. Yamamoto, T. Kawanishi, and H. Yamada, "Ultra-compact wavelength-tunable quantum-dot laser with silicon-photonics double ring filter," *Appl. Phys. Express*, vol.8, pp.062701-1-062701-4, 2015.
- 3 E. Timurdogan, Z. Su, C. V. Poulton, M. J. Byrd, S. Xin, R.-J. Shiu, B. R. Moss, E. S. Hosseini, and M. R. Watts, "AIM Process Design Kit (AIMPDKv2.0): Silicon Photonics Passive and Active Component Libraries on a 300mm Wafer," *Proc. OFC2018*, M3F.1, 2018.
- 4 T. Shi, T.-I. Su, N. Zhang, C.-Y. Hoang, and D. Pan, "Silicon Photonics Platform for 400G Data Center Applications," *Proc. OFC2018*, M3F.4, 2018.
- 5 R. Li, D. Patel, E. E.-Fiky, A. Samani, Z. Xing, Y. Wang, and D. V. Plant, "56 Gb/s DAC-less and DSP-free PAM-4 Using A Silicon Photonic Dual-drive Michelson Interferometric Modulator," *Proc. OFC2018*, W4D.1, 2018.
- 6 N. Yamamoto, K. Akahane, T. Kawanishi, H. Sotobayashi, H. Fujioka, and H. Takai, "Broadband light source using modulated quantum dot structures with sandwiched sub-nano separator (SSNS) technique," *Phys. Status Solidi C*, vol.8, no.2, pp.328-330, 2011.
- 7 N. Yamamoto, K. Akahane, T. Kawanishi, R. Katouf, and H. Sotobayashi, "Quantum Dot Optical Frequency Comb Laser with Mode-Selection Technique for 1- μ m Waveband Photonic Transport System," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.49, p.04DG03, 2010.
- 8 N. Yamamoto, K. Akahane, T. Umezawa, and T. Kawanishi, "Monolithically integrated quantum-dot optical modulator with semiconductor optical amplifier for 1.3- μ m waveband error-free 10-km-long transmission," *Proc. OFC2015*, WA2.24, 2015.
- 9 K. Akahane, N. Yamamoto, and M. Tsuchiya, "Highly stacked quantum-dot laser fabricated using a strain compensation technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, p.041121, 2008.
- 10 A. Matsumoto, K. Akahane, T. Sakamoto, T. Umezawa, A. Kanno, and N. Yamamoto, "Dynamic characteristics of 20-layer stacked QD-SOA with strain compensation technique by ultrafast signals using optical frequency comb," *Phys. Status Solidi A*, vol.214, no.3, pp.1600557-1-1600557-6, 2017.
- 11 A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, and N. Yamamoto, "Extremely stable temperature characteristics of 1550-nm band, p-doped, highly stacked quantum-dot laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.56, pp.04CH07-1-04CH07-5, 2017.
- 12 A. Matsumoto, K. Akahane, S. Matsui, Y. Akashi, T. Umezawa, N. Yamamoto, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, "Thermally Stable Ar-Implantation-Induced Intermixed Quantum Dot Laser Diode in High-Temperature Region," *Proc. CLEO/Europe-EQEC 2017*, CB-4.5, 2017.
- 13 A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, N. Yamamoto, H. Yamada, and T. Kita, "Demonstration of 1- μ m-band Si- Photonics- Based Quantum Dot Heterogeneous Tunable Laser," *Proc. CLEO2018*, JTu2A.15, 2018.
- 14 T. Umezawa, K. Akahane, N. Yamamoto, A. Kanno, and T. Kawanishi, "Highly Sensitive Photodetector Using Ultra-High-Density 1.5- μ m Quantum Dots for Advanced Optical Fiber Communications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.20, p.3801907, 2014.
- 15 A. Kanno, K. Inagaki, I. Morohashi, T. Sakamoto, T. Kuri, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, and K. Kitayama, "40 Gb/s W-band (75-110 GHz) 16-QAM radio-over-fiber signal generation and its wireless transmission," *Opt. Express*, vol.19, no.26, pp.B56-63, 2011.
- 16 K. Akahane, N. Yamamoto, A. Kanno, K. Inagaki, T. Umezawa, T. Kawanishi, T. Endo, Y. Tomomatsu, and T. Yamanoi, "Stable Two-Mode Emission from Semiconductor Quantum Dot Laser," *Appl. Phys. Express*,

4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

vol.6, pp.104001-1-104001-3, 2013.



松本 敦 (まつもと あつし)

ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究室
研究員
博士(工学)
光集積回路、超高速光デバイス、光アクセス
ネットワーク



山本直克 (やまもと なおかつ)

ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究
室長
博士(工学)
機能材料、光電子融合デバイス、伝送サブシ
ステム