

4-2 デバイス研究オーブンプラットフォームで支える Beyond 5G 技術 ～研究開発例：オールバンドテクノロジーによる未来通信の革新～

4-2 *Open Platform for Advanced ICT Device Supporting Beyond 5G - One of Research Activities: All Band Technology Opening-up Future Communications-*

山本 直克

YAMAMOTO Naokatsu

Beyond 5G はサイバーフィジカル社会を実現するための重要な社会インフラである。先端 ICT デバイスラボは、産学官連携によるデバイス研究開発を中心としたオーブンプラットフォームとして機能し、Beyond 5G を実現するためのデバイス基盤技術の研究開発を支えている。サイバーフィジカル社会を具現化するためには、光波や mmW / THz などの高周波等のあらゆる「波」の状態を高度かつ精密に利用して、テラビット級大容量伝送システムを構築する必要がある。そのため、光や電波などの伝送メディアと、光ファイバや空間などの伝送メソッドを効率的に組み合わせることで大容量化を達成する「オールバンドコミュニケーション技術」について紹介する。また、先端 ICT デバイスラボで議論されている Beyond 5G 技術の一例として、光と電波をワンチップ上で生成・処理することをめざした「オールバンド集積デバイス技術」について解説する。

Beyond 5G is an important social infrastructure for realizing a cyber-physical society. The Advanced ICT Device Laboratory functions as an open platform focusing on device research and development through industry-academia-government collaboration, and supports research and development of the device technologies to realize Beyond 5G. In order to realize the cyber-physical society, it is necessary to construct a Tbps-class high-capacity transmission system that uses all kinds of “wave” states, such as light waves and mmW / THz waves, in a sophisticated and precise manner. Here, we will introduce “all-band communication technology,” which achieves high capacity by efficiently combining transmission media such as light and radio waves with transmission methods such as optical fiber and space. In addition, as one of the Beyond 5G technologies being discussed in the Advanced ICT Device Laboratory, “all-band integrated device technology,” which aims to generate and process optical and radio waves on a single chip, will be explained.

1 Beyond 5G に向けたデバイス基盤技術 研究の重要性

Beyond 5G を社会インフラとする未来社会ではどのような世界が広がっているか、それを想像することも研究開発の方向性を見出すためにも重要である。その一つの解は Society 5.0 をキーワードとするサイバーフィジカル社会の構築である。明るく豊かな人生のために、もしくは暗く耐えがたい社会課題解決のために、例えば図 1 のような魅力的なアプリケーションが考えられる [1]-[3]。

- ① 移動困難者支援や都市圏簡易移動手段としてのパーソナルモビリティ
- ② 医師不足やルーラルエリアの医療高度化と高度

AI 医師利用、パーソナル医療

- ③ 要介護者支援などの社会課題解決のための遠隔介護、介助
- ④ 危険地帯や宇宙、深海、人体内等の未踏空間の探索や作業に寄与するアバターロボットやマイクロロボット
- ⑤ 機器・施設や人体などのデジタルツインによる損傷や病状等の早期診断や治療等にもなる将来予想
- ⑥ サイバー空間の物理空間へのオーバーレイによる拡張現実感
- ⑦ IoT (Internet of Things) に対応した高感度・高精度センサー群による環境情報収集
- ⑧ 脳情報のアップロード、外部記憶、外部思考処

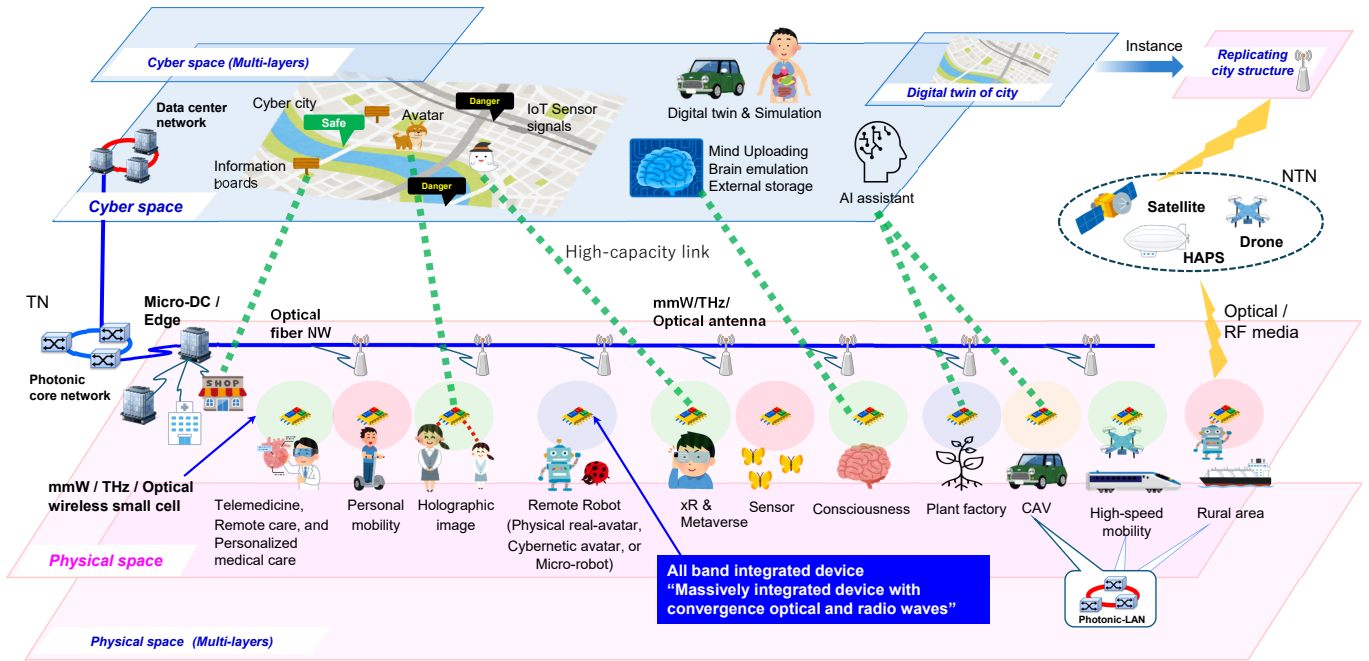


図1 サイバーフィジカルシステムのための Beyond 5G: 光・電波融合技術

理としてのサイバー空間利用

⑨ 高効率植物工場運営や自動運転でのサイバー空間上の AI 利用

これらのアプリケーションは人間の時間的、空間的、物理的(身体的)、さらに精神的な開放につながる事が期待されるが、この様な極めて高度な社会システムを構築するには、物理空間で生成される大量の情報と、データセンタ等で演算された情報を相互作用させる「サイバーフィジカルシステム」が必要である。この相互作用の強度は情報量に依存すると考えられ、サイバー空間と物理空間をより密に接続する、つまり違和感なく接続するためには大容量・超高速で、かつ高いリアルタイム性(低遅延)を有する情報通信インフラが必須となる。また、図1にも示すように身近な通信では「半固定」つまり「わずかに動くモノ」が多く存在することから、光ファイバ通信と無線通信の融合が重要となり光と電波を調和的に利用する光・電波融合ネットワークインフラが必須となる[2][3]。これは Beyond 5G 技術の研究開発で向かう一つの方向である。無線・有線通信のデータ伝送容量のトレンドから、近い将来にはテラビット級を超えるデータ伝送容量が試算される[2][3]。このことは mmW / THz 帯の高周波無線や光無線の利用、さらに光ファイバとシームレスに無線区間を接続する光ファイバ無線などのテラビット級大容量に対応した伝送システムが必要になることを意味している。この大容量伝送システムを、遠隔のデータセンタやエッジ等とモバイル端末等の間で実現するには、アンテナ局を増加させ無線区間を介して素早く光ファ

イバネットワークに大量のデータを収容する必要がある。結果として、光ファイバ網の先にブドウの房のように極めて多数のスマートセルが形成されることになると推察される。このような情報通信ネットワークを構築するために、mmW や THz 波、光波などの多様な伝送メディアと光ファイバや空間などの多様な伝送メソッドを組み合わせた大容量情報通信技術：オールバンドコミュニケーションシステムが必要となり、また、これをワンチップで処理・利活用できるような光・電波融合デバイス=オールバンド集積デバイスがキーデバイスとなると考えられる。

過去にも小さなデバイスが世界を一変させたことはある。オールバンド集積デバイスがそれになるというのは、現時点では期待に過ぎない。しかし、サイバーフィジカル社会を支える新たなインフラを創造・構築する上で重要なキーデバイスの一つになることは確かである。先端的なデバイス技術の研究開発を推進するためには、新たな材料物性やデバイス機能の発見、適切なデバイス構造による機能の効率の発見、さらに環境負荷やコスト等を考慮したサステナビリティなど、広い知見が必要である。このため、デバイスの研究開発では、多くの知見を得るために様々な分野の研究者が情報交換し、連携を深めながら研究推進することが肝要となる。このような背景の下、NICT ではチャレンジングで先端的なデバイス基盤技術の研究開発を推進するために「先端 ICT デバイ斯拉ボ」を組織化しており、デバイス分野における産学官のオープンイノベーション拠点として機能している。先端 ICT デバイ

スラボでは、広い範囲の「デバイス基盤」の研究開発が実施されており、Beyond 5G等の将来の情報通信インフラへの応用はもちろん、基礎科学や社会展開などの新たな知の創造に貢献することをめざしている。

2 光・電波融合によるオールバンドテクノロジー

2.1 オールバンドシステム技術

サイバーフィジカル社会を実現するためには、前述の様に、サイバー空間とフィジカル空間等の二体間のコミュニケーション的距離は、それらの間の情報通信容量の大きさに影響する。つまり大容量伝送はそれだけコミュニケーションに対する「違和感」をなくすことができる。サイバーフィジカル社会では、「わずかに動くモノ」をネットワークに効率的に組み込むことが必要となる。そのためには、光・電波を融合して、利用シーンに応じてそれら伝送メディアを使い分ける、もしくは相補的に利用することが肝要となる。結果的に、あらゆる周波数帯域の電磁波をすべて情報通信に利用する概念として「オールバンド」が有望と期待される。図2にオールバンドコミュニケーションシステムのイ

メージを示す。大容量通信のバックボーンとして光ファイバネットワークがあり、近赤外(波長1.0～1.5ミクロン帯)が利用される。また、Beyond 5G時代に要求されるテラビット級の移動体への大容量接続では、mmW / THz波(100～300GHz帯域)の利用が期待される。さらに、ワイヤレス通信では光波を利用した光無線(Optical Wireless Communication: OWCもしくはFree-space optics: FSO)も大容量情報通信の候補となる[4]-[8]。オールバンド技術では、端末や伝送経路の種類と特性に応じて、光や電波などの伝送メディアや、無線や光ファイバなどの伝送メソッドを柔軟に切り替えることでテラビット級の大容量接続を維持することを目指すことになる。光・電波融合をもとにしたオールバンドコミュニケーションシステムを構築するときには、図2に示すように様々な箇所で、光や電波の相互変換が必要となり、そのため光と電波などの波の状態を相互に変換するための光・電波融合デバイスがキーテクノロジーとなる。

2.2 オールバンド集積デバイス技術

テラビット級の大容量情報通信が一般的になった世界を考えたとき、100GHz級の信号を頻繁に利用する

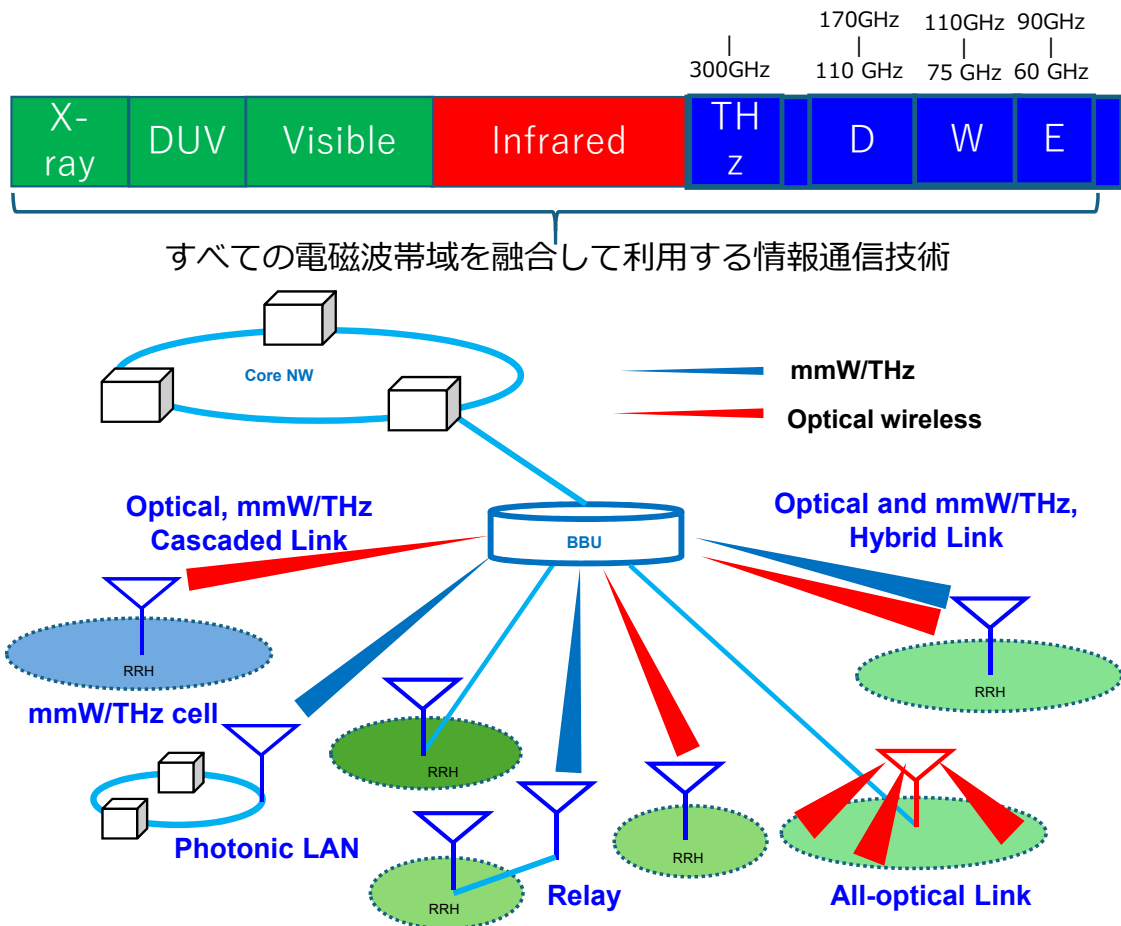


図2 オールバンドコミュニケーションシステムの概念図

4 Beyond 5G 協創プラットフォーム

機会も増えると予想され、先のオールバンドコミュニケーションシステムを構築するためには多数の光・電波相互変換デバイスが必要となる。しかし、mmW / THz帯の高周波はそれほど簡単に扱えるモノではなく、数メートル程度の距離でも激しく減衰し、急激に曲げると放射してどこかに消えてしまう。このため、光や高周波を効率的に変換するためには、1つの小さなチップ内で光と電波を集め処理する必要がある。つまり、あらゆる周波数の電磁波をワンチップ内で処理する光・電波融合デバイス=オールバンド集積デバイス技術が要となる。図3にオールバンド集積デバイスの一例を示す[9]。オールバンド集積デバイス

は、①RF (Radio Frequency) 入出力ポート、②RF回路ブロック、③光入出力ポート、④光回路ブロック、⑤光ゲインブロック [10]、⑥光・電波変換ブロック (Optical to Radio converter : O2R) [11]、⑦電波・光変換ブロック (Radio to Optical converter : R2O) [12] の7要素の機能ブロックで構成される。各要素は、様々な材料で構成され、例えばRF回路ブロックではSiやSiGe系IV族半導体が主要材料であり、光ゲインブロックではInP等のIII-V族半導体を中心となる。このためそれぞれの材料の特徴を最大限に生かした異種材料集積、つまりヘテロジニアス集積技術が重要となる。図4にオールバンド集積デバイス構成のための集積化技術の方向性を示す[13]。将来、光・電波融合を目的とした場合、様々な材料を利用することが考えられる。その中で、図4のMaterial AとMaterial Bのように集積化に適した材料の組み合わせもあれば、Material DとMaterial Yのように適さない材料系も存在する。結果として、集積化に適した材料系により、ある機能を有したモノリシック集積デバイスを複数準備し、それらを組み合わせることでヘテロジニアス集積デバイスが構成されると思われる。そして異種材料により発現される各機能を集約する形で、光・電波融合を可能とするオールバンド集積デバイスが完成すると期待される。

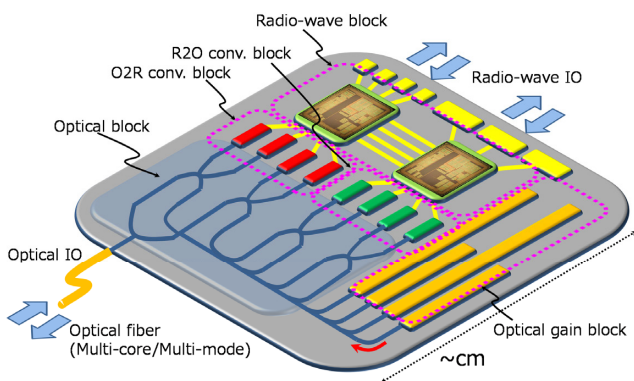


図3 オールバンド集積デバイス(光・電波融合デバイス)の構成イメージ

オールバンド集積デバイスの一例を図5に示す[13]。

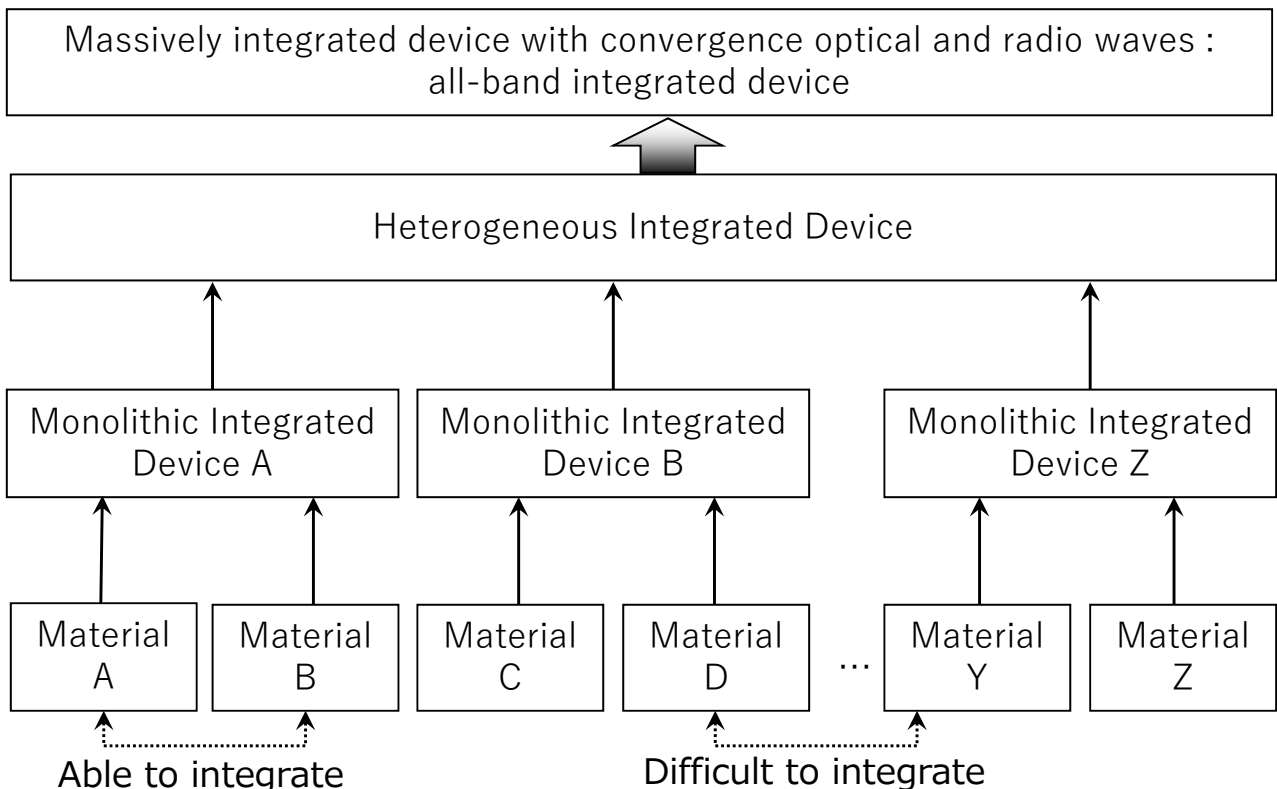


図4 デバイス集積化技術の方向性

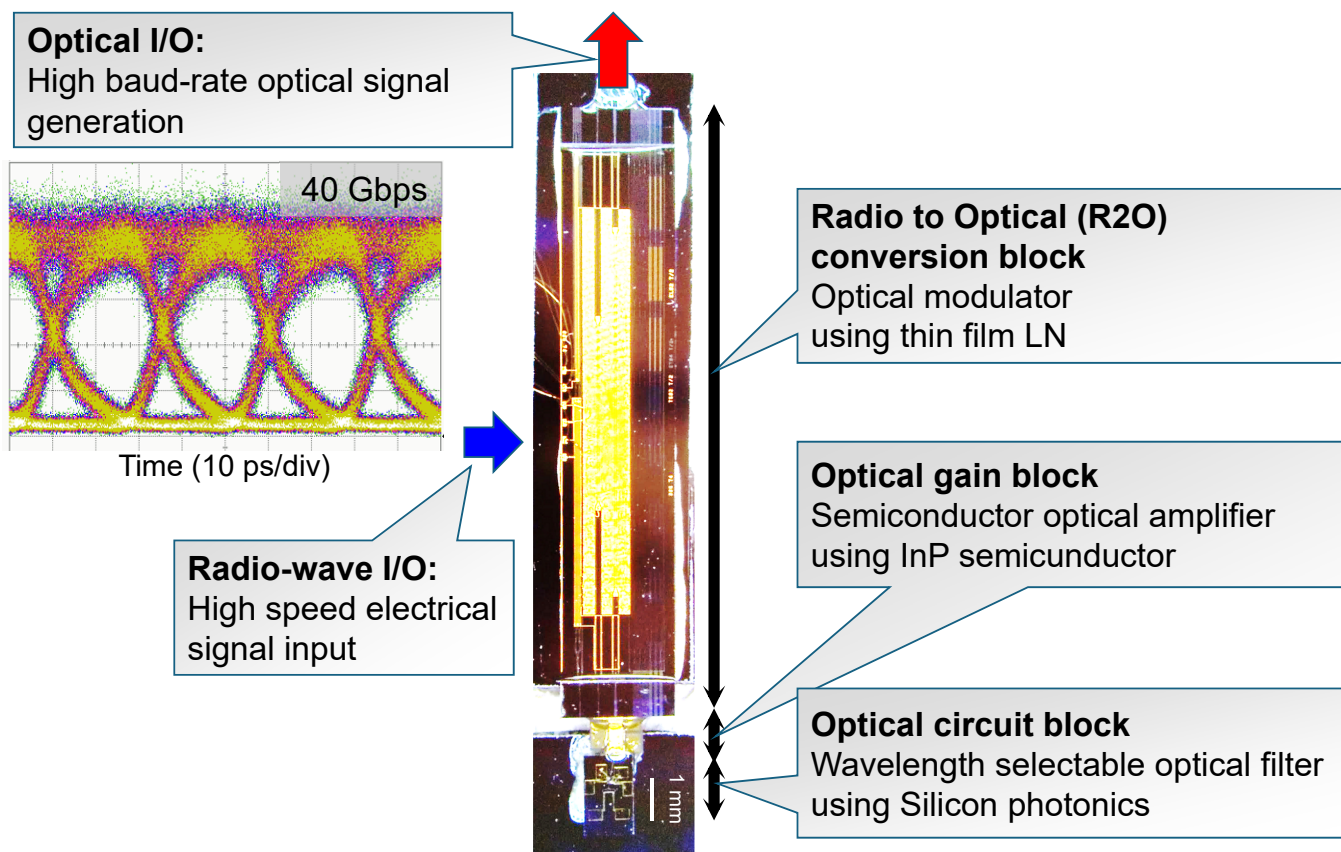


図5 ヘテロジニアス集積化技術によるオールバンド集積デバイスの例

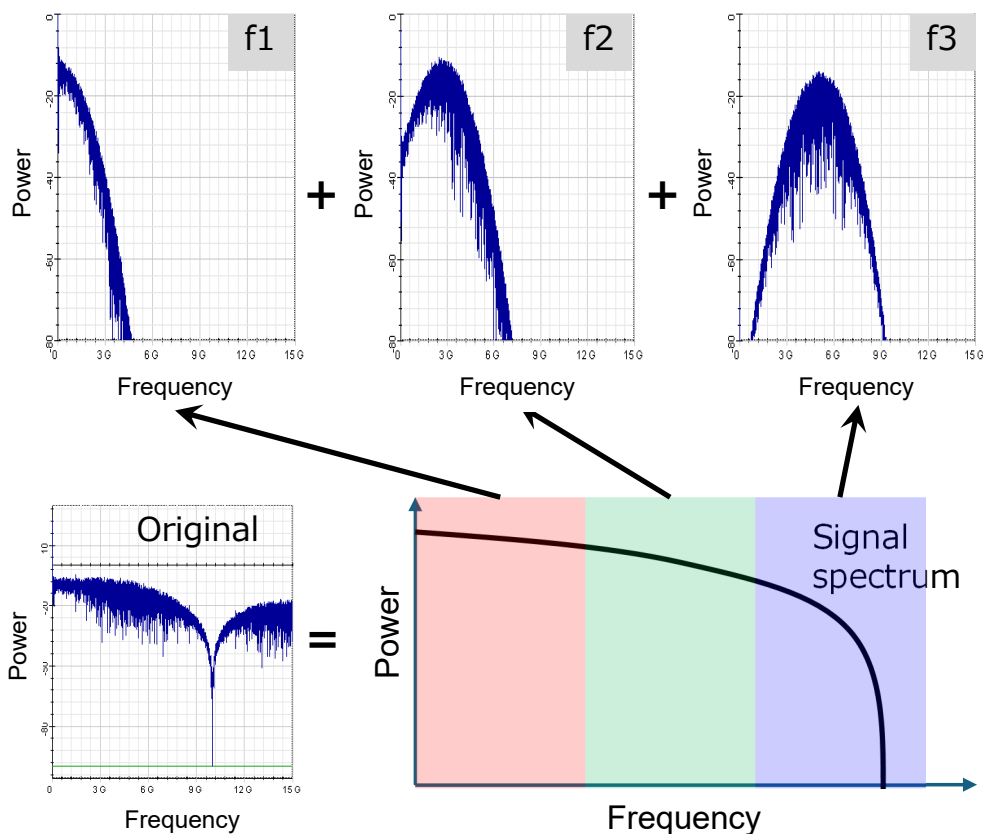


図6 Wave Aggregation によるデータ信号スペクトルの周波数分割

4 Beyond 5G 協創プラットフォーム

このデバイスでは、光ゲインブロックに InP 系半導体光アンプ、光回路ブロックにシリコン細線導波路によるリング共振型波長可変フィルタ [14]、R2O ブロックに薄膜 LiNbO₃ による超高速光変調器を組み合わせたものである。これはごく微小な光トランシーバとして機能し、外部から入力された高速な 40 Gbps 電気信号 (RF 信号) を光データ信号に変換・送信に成功している。各機能ブロックは材料物性を最大限に生かしたモノリシック集積デバイスであり、ヘテロジニアス発想による集積によりトランシーバとしての高い機能性を発現していることがわかる。ここで、機能ブロックの交換による性能向上が可能である点は、ヘテロジニアス集積技術のメリットであることを付記する。つまり、例えば光アンプブロックに別の材料系で構成されたより高機能のデバイスを用いることができれば、全体の集積デバイスとしての性能は向上することが期待される。

オールバンド集積デバイスでは、光や電波などあらゆる周波数を利用することを念頭に入れている。しかし一方で、特に RF 信号に関しては単純に広帯域化を延伸することが困難になる時代が来るかもしれない。

例えば 300 GHz 超の広帯域信号を高効率に電気・光変換することを考えたときに、1つの光変調デバイスで「永続的に」実現できるのか？という事は常に考える必要がある。その解になる一つの可能性として Wave aggregation 技術があげられる [15]。図 6 にその概要を示す。広帯域信号を複数の周波数帯域に分割し、それぞれの帯域でのみ動作する、いわゆる狭帯域で動作する複数のデバイスを平行に配置し、統合的に信号変換・信号処理を行う手法である。帯域としては狭いが 10 Gbps 信号に関する Wave aggregation 技術の適用シミュレーション例を図 7 に示す。10 Gbps 信号の周波数スペクトルを f1, f2, f3 の 3つの帯域に分割し、それらを個々の狭帯域光変調器に入力し光伝送を行う。これを受信側で、f1 + f2 + f3 とすべての周波数帯域が統合されると図 7 のようにアイ開口が観測され、一方で f1 + f3 の場合にはアイ開口がクローズとなる。このシミュレーションはアナログ的な周波数分割・統合の例ではあるが、広帯域信号を平行的に処理・伝送することは今後必要になると考えられ、これはデバイス単体への負荷の低減につながる。さらに、このような帯域ごとの信号処理はオールバンド集積デバイスの

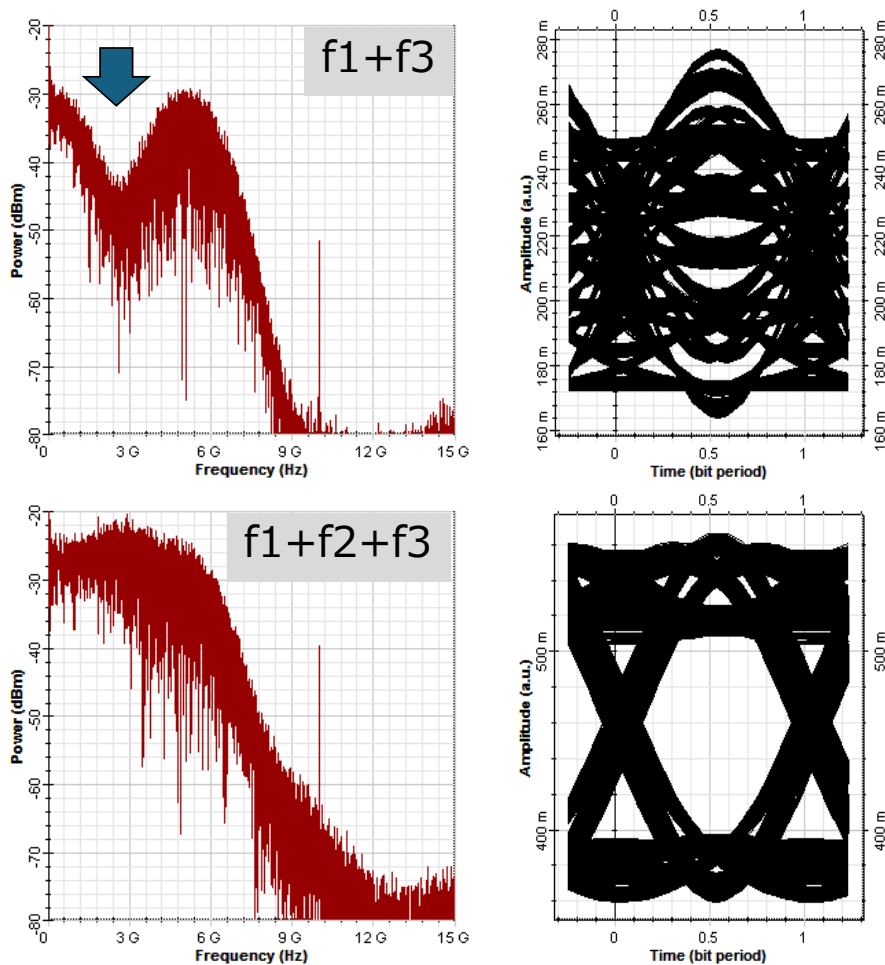


図 7 Wave Aggregation による再構成のシミュレーション結果

発想と整合性が良く、帯域ごとの処理ブロックを準備することで永続的な広帯域化に寄与することが期待される。

2.3 オールバンドテクノロジーの将来の技術要素

オールバンドテクノロジーを背景とする技術開発要素について、その方向性を図8に示す。オールバンドコミュニケーションシステムでは、超大容量性に優れたフォトニックネットワークを中核として、大容量・可用性に優れた mmW / THz・光無線ネットワークがスモールセルの様に接続されると考えられる。その上でセキュリティ耐性の向上や量子コンピューティングのネットワーク化を担保するための量子ネットワークの存在も考えられる。これらのことから、フィジカル空間とサイバー空間を密に接続するために、量子・光・mmW / THz等の全ての「波」を調和的に利用して情報通信ネットワークを構成するオールバンドコミュニケーションが一つの方向性になる。また、そのようなあらゆる波を高度に利用するために、伝送メディアとしての「波」を相互に高効率変換することで、メディア間の境界をなくす「光・電波融合デバイス=オールバンド集積デバイス」が双対の技術として重要になる。このような考察の結果として、図8に示すような様々な基盤技術の創出が将来求められる。例えば、光ファイバネットワークの大容量化のためのマルチコア/マルチモード光ファイバ伝送技術、波長 1.0～1.6 ミクロン帯域 (T, O, E, S, C, L-band) を活用するマルチバンド光伝送技術 [16]、光ファイバ通信と無線通信(移動体通信)をシームレスにつなぐ光・電波融合のための

mmW / THz帯光ファイバ無線や光無線技術が求められる。さらに、それらの大容量情報通信をデバイスレベルで支える超高速光・電波相互変換技術(光変調器、受光器、光・高周波の周波数変換等)や、光と高周波モノリシック集積デバイスの高密度実装によるヘテロジニアス機能集積技術、無線区間で超大容量を実現するための mmW / THz帯高周波デバイス技術、周波数軸上での高精度基準と物差しに相当する超小型原子時計や光周波数コム等による基準周波数生成と配信、さらに先に述べた狭帯域デバイスをパラレル化することによる広帯域一括処理技術: Wave aggregation 技術が重要な研究開発要素と成り得る。オールバンドをキーワードとした、これら多数の基盤技術が、未来の Beyond 5G時代のネットワーク構築に大きく寄与すると考えられる。

3 デバイス基盤技術の研究開発オープンプラットフォーム

3.1 デバイス製造・評価

サイバーフィジカル社会を支える Beyond 5G ネットワークインフラを実現するには、光や高周波に関連したより高度な材料・デバイス技術が必要とする。材料・デバイス技術の研究開発は、様々なアプリケーションと違い、一般的には理解が難しく目立たない存在になってしまっている印象を受ける。しかし、デバイスは影のインフラとして、社会基盤を形作るために必須なモノである。図9にデバイス研究開発工程フローの一例を示す。革新的機能や性能向上に関するデ

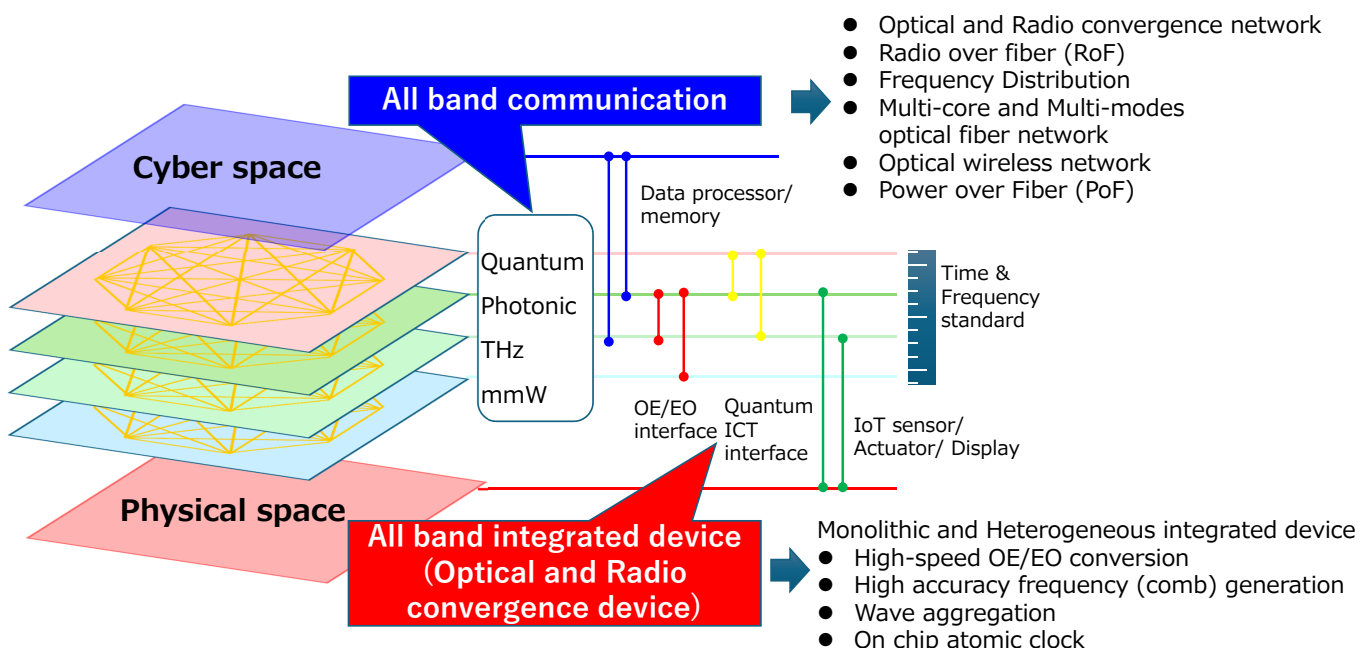


図8 All-band communication system と All-band integrated device のための基盤技術

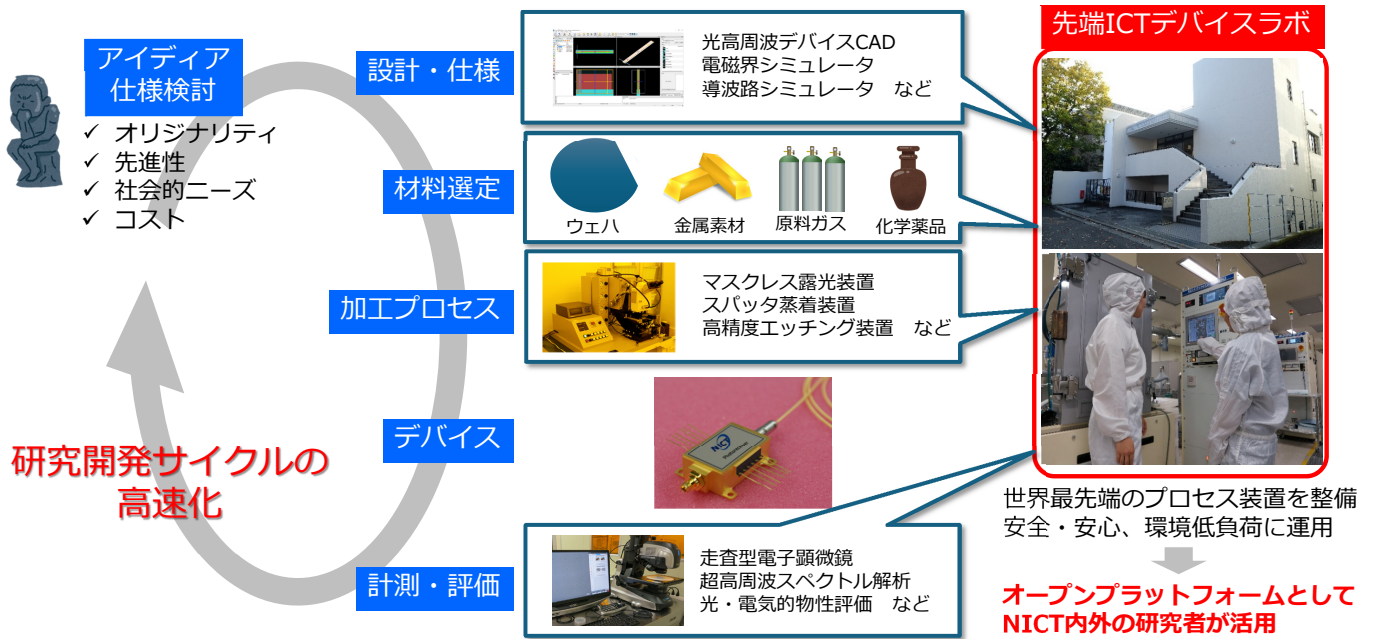


図9 デバイス研究開発の工程フローの概要

デバイス・アイデアを研究者が生み出すことが、全ての発端にある。そこにはオリジナリティや先進性などの技術的な視点に加え、社会課題解決や製造コスト、環境負荷などの経済的視点も必要になる。デバイス・アイデアを基にデバイス構造をより具体化するが、理論計算や各種シミュレータによる設計がなされる。例えば、光導波路構造の最適化のための電磁界シミュレータでは有限差分時間領域法 (Finite Difference Time Domain Method: FDTD) を用いたり、デバイス内の電流・キャリア分布や熱伝導シミュレーションを同時に計算するようなマルチフィジックス・シミュレータが広く利用されている。デバイス構造がある程度確定すると、材料や加工プロセスの選定を行い、研究者や技術者のデバイス作製ノウハウとともにデバイスが完成する。その後、各種物性評価装置や光・高周波計測装置などを用いることでデバイス性能が評価される。一回のデバイス試作で所望の性能を得られることは稀であり、このようなデバイス作製サイクルを何度も何度も繰り返すことで、デバイスの機能は高度化される。当然のことながら、何度繰り返しても当初のアイデア通りの性能に達しないこともあり、いわゆる「お蔵入り」となるアイデアは多い。このため材料・デバイス研究は他の研究分野と比較して長い研究期間を要することが知られている。

デバイス試作・開発サイクルを高速に回すことで、デバイス・アイデアの妥当性の検証を早めることができ、また世界最高峰を目指した機能の高度化ではそのデバイス開発スピードを格段に早められる。NICT

先端 ICT デバイスラボは、このようなデバイス加工に関する装置群を有している。NICT 内研究者はもちろん、大学や企業などの外部研究者や学生などが広く利用できる環境としてオープンプラットフォームの形で運営を行っており、これによりひらめいた新しいデバイス・アイデアをラボでいち早く具体化できることから、そのアイデア実証に貢献している。図10はラボのクリーンルーム内である。クラス10,000と100(イエロールーム)を有しており、その内部には半導体結晶成長装置を始め、メタル蒸着やドライエッチング装置、微細パターニング用の高精細露光装置やレーザ直接描画装置などが配備されている。ナノからミクロンサイズの半導体・誘電体デバイスの加工が可能であり、先述のオールバンド集積デバイスなどの最先端のデバイス研究開発プロジェクトが多数、同時進行で推進されている。

オールバンド集積デバイスでは、Beyond 5G 時代のテラビット級大容量伝送を実現するために光や mmW / THz 帯などの高周波を処理することが求められる。そのため、光や高周波に対応したスペクトルアナライザやオシロスコープ等の高速計測装置や、大容量データ伝送のためのシグナルジェネレータやエラーレートテスターなどのネットワーク計測装置が必要となる。ラボではこれら計測装置を整備しており、ラボ内で開発したデバイスの光・電気特性をタイムリーに評価することが可能である。これらの装置についてもオープンプラットフォームの一つとして、NICT 内外の研究者に広く利用され、Beyond 5G に向けたデバイ

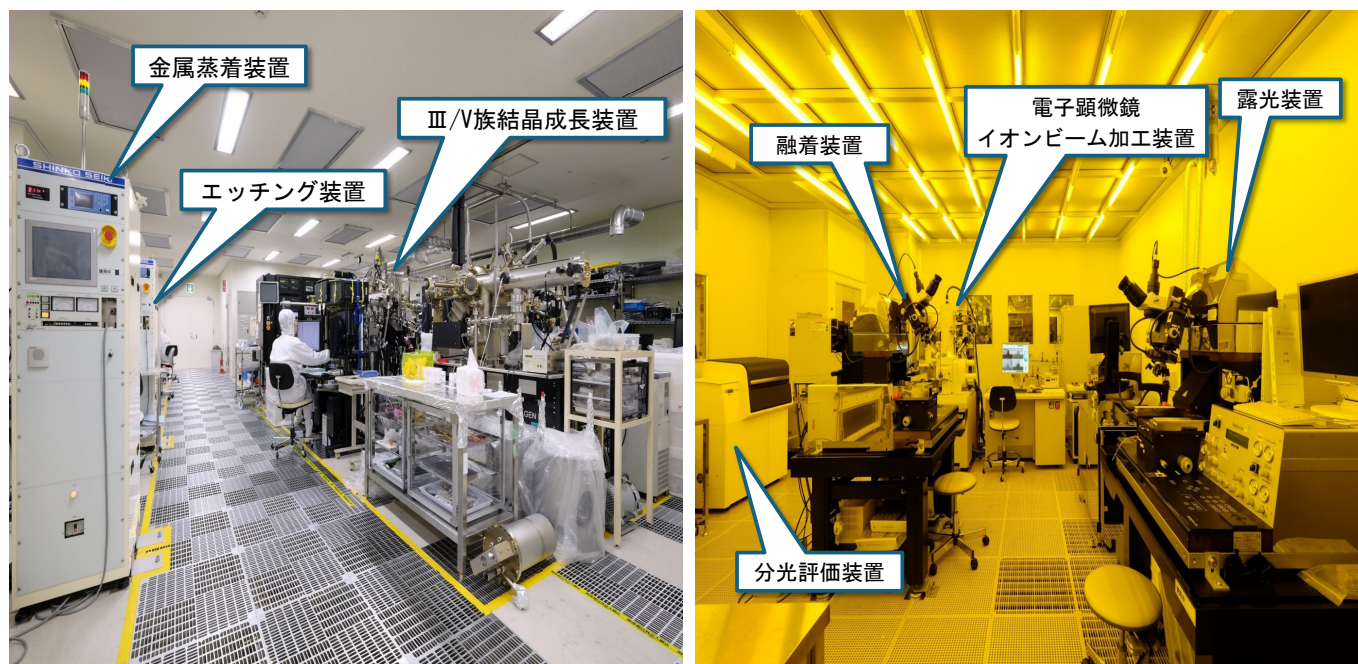


図 10 先端 ICT デバイスラボのデバイス研究開発環境



図 11 先端 ICT デバイスラボ コラボレーションミーティング

ス研究開発プロジェクトの推進に寄与している。

3.2 コラボレーション

Beyond 5G への展開を見据えたデバイス研究開発では、デバイスの基本的な性能向上はもちろんのこと、先述したオールバンド集積デバイスの様に光や高周波を高度に処理することが求められる。このような高度で革新的なデバイス研究を推進するためには、新しいアイデアの創出が求められ、そのためには研究者の新しい知見のインプットが必要である。そのような背

景のもと、先端 ICT デバイスラボではラボで研究活動を行っている研究者によるコラボレーションミーティングを実施している。図 11 にそのミーティングの風景を示すが、光集積デバイス、高周波電子デバイス、パワーエレクトロニクスデバイス、超伝導デバイス、有機 EO ポリマーデバイス、量子デバイス、新材料物性など、様々な分野の材料・デバイス研究者が一堂に会した議論が繰り広げられる。オープンプラットフォームでは、デバイス研究開発拠点として世界最高峰の研究環境を提供することが主目的であるが、Beyond 5G 技術の構

築という難課題を前に研究者が有機的に連携し、アイデアを出し合うことが重要であると考えている。

4 まとめ

本稿では、Beyond 5G のデバイス研究開発を支えるオープンプラットフォームとしての先端 ICT デバイスラボについて紹介した。Beyond 5G 技術はサイバーフィジカル社会を構築するための社会インフラ基盤として期待される。その中のシステム技術の一つとして、光波や mmW / THz などのあらゆる電磁波を伝送メディアとして活用してテラビット級大容量伝送を実現するオールバンドコミュニケーションシステムについて概要を述べた。また、そのようなシステムを構築するためには光波と電波を効率よく相互変換することが重要であることから、そのような光・電波の処理を実現するオールバンド集積デバイスについて述べた。研究者のデバイスに関する新しいアイデアを如何に早く具現化し、その性能を高められるかが技術の進歩に影響するが、オープンプラットフォームである先端 ICT デバイスラボの存在は、その研究開発のスピード向上に大きく寄与していると期待する。小さなデバイスが社会を一変させ、より明るく豊かな世界を築くことができると信じており、先端 ICT デバイスラボからそのような革新的デバイスが創出されることを願っている。

謝辞

研究開発の方向性について議論をいただいた早稲田大学 川西 哲也氏、北智 洋氏、名古屋工業大学 菅野 敦史氏、青山学院大学 外林 秀之氏、NICT 田中 秀吉氏、赤羽 浩一氏、松本 敦氏、梅沢 俊匡氏、山口 祐也氏、岡田 祥氏、Chih-Hsien Cheng 氏、Paikun Zhu 氏、中島 慎也氏、Pham Tien Dat 氏、Zu-Kai Weng 氏、稲垣 恵三氏、吉田 悠来氏、高橋 亮氏、先端 ICT デバイスラボ・スタッフ皆様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1 総務省、Beyond 5G 推進戦略懇談会提言
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696612.pdf
- 2 情報通信研究機構ホワイトペーパー、“Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー,” <https://www2.nict.go.jp/idi/>
- 3 山中直明, “Beyond 5G 時代のネットワークビジョン—2030 年に向けたアーキテクチャとブレークスルー技術の鳥瞰—,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J104-B, no.3 pp.315–336, 2020.
- 4 P. T. Dat et al., “3 × 3 MIMO Fiber–Wireless System in W-Band with WDM/PDM RoF Transmission Capability,” Journal of Lightwave Technology, vol.39, no.24 pp.7794–7803, 2021.
- 5 P. T. Dat et al., “Transparent Relay and Switching of THz-Wave Signals in 285-GHz Band Using Photonic Technology,” Proc. Optical Fiber Communication Conference Th4A.6, 2023.
- 6 P. T. Dat et al., “151.5-GHz Sub-THz Signal Reception and Downconversion

Using All-Optical Technology,” Proc. Optical Fiber Communication Conference, Th3F.1., 2024.

- 7 Zu-Kai Weng et al., “Demonstration of Robust Mobile Free Space Optical System using High-speed Beam Tracking and 2D-PDA-based Spatial-Diversity Reception,” Proc. Optical Fiber Communication Conference, M3Z.2, 2024.
- 8 Zu-Kai Weng et al., “40-Gbit/s Mobile FSO with High-speed Beam Stabilizer and 2D-PDA-based Diversity Receiver for Support Robots,” Proc. Optical Fiber Communication Conference, Tu2K.6, 2024.
- 9 松本 敦, 山本直克, “光電子融合プラットフォーム,” 情報通信研究機構研究報告 vol.64, no.2, 2018.
- 10 N. Yamamoto et al., “Characterization of Wavelength-Tunable Quantum Dot External Cavity Laser for 1.3- μ m-Waveband Coherent Light Sources,” Jpn. J. Appl. Phys. vol.51, p.02BG08, 2012.
- 11 T. Umezawa et al., “Large Submillimeter High-Speed Photodetector for Large Aperture FSO Receiver,” J. Select. Topics in Quantum Electronics vol.28, Issue 2, 3801709, 2022.
- 12 Y. Yamaguchi et al., “Thin-Film Lithium Niobate Modulator for a Flat Frequency-Response over 110 GHz Bandwidth with Integrated Electro-Optic Frequency-Domain Equalizer,” Proc. Optical Communications Conference, M3K.4, 2024.
- 13 A. Matsumoto and N. Yamamoto, “Advanced Monolithic and Heterogeneous Photonic Integration Technology,” Handbook of Radio and Optical Networks Convergence, Springer, 2023.
- 14 T. Kita et al., “Tunable Dual-Wavelength Heterogeneous Quantum Dot Laser Diode with a Silicon External Cavity,” Journal of Lightwave Technology vol.36, no.2, pp.219–224, 2018.
- 15 N. Yamamoto et al., “Cooperative Opto-electrical Operation of Parallel Photonic Devices for Broadening Optical Transport Capacity,” Abstract of Progress in Electromagnetics Research Symposium, p.1375, 2014.
- 16 N. Yamamoto et al., “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.



山本 直克 (やまもと なおかつ)

ネットワーク研究所
フォトリック ICT 研究センター
副研究センター長/
ネットワーク研究所
先端 ICT デバイスラボ
ラボ長
博士(工学)

半導体ナノ材料、異種材料集積光デバイス、
光・電波融合

【受賞歴】

- 2024 年 前島密賞
- 2021 年 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
チュートリアル論文賞
- 2015 年 ITU Kaleidoscope Academic
Conference 2015、最優秀論文賞