

## 4-2 先端 ICT デバイスラボを活用した革新的デバイス技術の研究開発

### 4-2 Research and Development of Innovative Device Technologies using the Advanced ICT Device Laboratory

#### 4-2-1 光・電波融合デバイス技術

##### 4-2-1 Optical and Radio-wave Convergence Device Technology

山本 直克 松本 敦

YAMAMOTO Naokatsu and MATSUMOTO Atsushi

将来のサイバーフィジカル社会では光ファイバ通信と大容量無線通信をシームレスに接続し、光や高周波などのあらゆる伝送メディアを調和的に利用することが求められる。そのために先端 ICT デバイスラボでは、チップ内で光と電波を相互作用させるための光・電波融合デバイスの研究開発を推進している。本節では、光・電波融合技術について、その研究開発の方向性について紹介する。

In the future cyber-physical society, optical fiber communications and high-capacity wireless communications must be connected seamlessly, and all transmission media, including optical and radio frequency, will be used harmoniously. The Advanced ICT Device Laboratory is, therefore, promoting research and development of optical and radio-wave convergence devices to interact with light and radio waves within a chip. In this paper, we introduce the direction of research and development of optical and radio wave convergence technology.

### 1 はじめに

4-2 では、将来の情報通信を支えるための革新的デバイス技術として先端 ICT デバイスラボで推進されている以下のデバイス技術を代表例として、その研究成果を示す。

- (1) 光・電波融合デバイス技術：光・電波融合ネットワークを実現するための要素技術として、異種材料を組み合わせるヘテロジニアス光集積デバイスに関する研究開発
- (2) 超高速電子デバイス技術：テラヘルツ帯大容量無線のための化合物半導体を用いた高電子移動度トランジスタに関する研究開発 (本研究報告 4-2-2)
- (3) シリコン CMOS 高周波集積回路技術:sub-THz 帯無線通信技術のためのシリコン半導体を用いた超高速電子集積デバイスに関する研究開発 (本研究報告 4-2-3)
- (4) 酸化ガリウムデバイス技術：超高性能パワー半導体材料として注目される酸化ガリウムによるトランジスタ技術に関する研究開発 (本研究報告 4-2-4)
- (5) マイクロ光コムデバイス技術：窒化シリコン光導

波路によるリング共振器を用いた高精度・光周波数コム生成に関する研究開発 (本研究報告 4-2-5)

- (6) 超小型原子時計技術：波長可変面発光レーザを集積した超小型原子時計の研究開発 (本研究報告 4-2-6)

(2)以降はほかの節に譲り、ここでは(1)について述べる。

### 2 光・電波融合とあらゆる波を駆使する「All-band」技術

将来のサイバーフィジカル社会では「わずかに動くモノ」が多数実装されると考えられることから光ファイバを用いた大容量有線ネットワークと、モバイルに対応した無線通信ネットワークの融合が必須となり、結果として光集積デバイスや超高速電子デバイスに加え、光・電波融合をキーワードとするデバイス技術が重要となる [1]。サイバーフィジカル社会として、物理空間にオーバーレイする形でサイバー空間が形作られることになる。このサイバー空間はデータセンター内の演算によって、もしくは低遅延性を考慮したエッジ

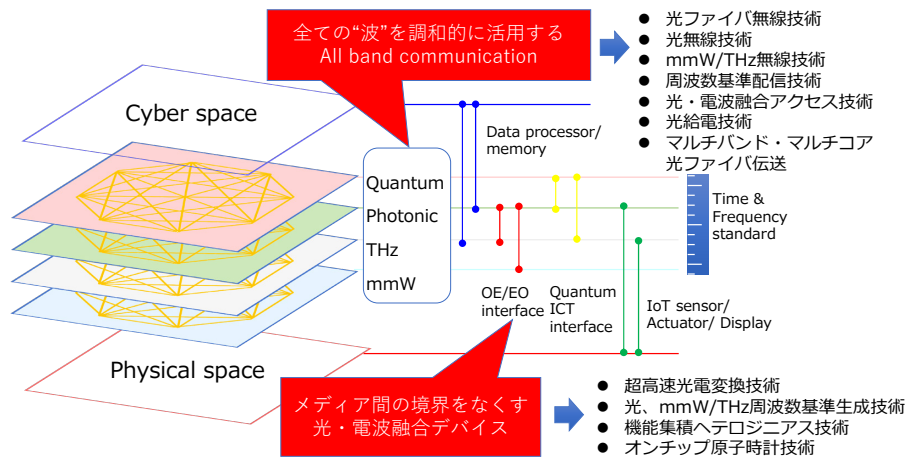


図1 Society 5.0 時代のための研究開発へ向けたコンセプト

コンピューティングによって形成されるものであるので、物理空間とサイバー空間を大容量情報通信で接続する必要がある。そのために光ファイバネットワークはその要として必要であるが、先述のように、大部分の端末、つまり将来創造されるであろうアバターロボットやパーソナルモビリティ、xR インターフェースなどは無線接続が主であると考えられることから無線区間の大容量化も求められる。しかし伝送容量の試算はサービスに依存するため、一概に大容量化の目標値を設定することは難しい。一つの方法として無線・有線通信のデータ伝送容量が年次に対して指数関数的に伸びるトレンドから試算すると、近い将来には Tbps 級を超えると思算される [2][3]。これを前提とするならば、mmW/THz 帯の高周波無線や光無線、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 Tbps 級大容量伝送システムが必要になる。高周波の特性上、無線のセルサイズは小さくなる。そのため遠隔データセンターやエッジ等との長距離・大容量情報通信を実現するためには、アンテナ局を増加させモバイル端末で利用される大量のデータを、無線区間を介して素早く光ファイバネットワークに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経路を組み合わせた大容量情報通信、これをワンチップ内で処理・利活用できるような光・電波融合デバイスがキーデバイスとなると考えられる。このような考察の結果として、情報通信技術の方向性を図1に示す。Society5.0 時代のサイバーフィジカル社会をコンセプトとすると、セキュリティ耐性の高い量子ネットワーク、超大容量性に優れたフォトニックネットワーク、大容量・可用性に優れた mmW/THz・光無線ネット

ワークなどを介して物理空間とサイバー空間が接続されることになる。そのため量子・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「All-band communication」が一つの方向性になる。また、そのような All-band の利用を促進するために、伝送メディアとしての波を相互に変換することで、メディア間の境界をなくす「光・電波融合デバイス」もしくは「All-band device」がもう一つの方向性として重要になる。このような方向性を考えたとき、図1右に示すような様々な基盤技術の創出が重要と考えられる。例えば、光ファイバ通信と無線通信をシームレスにつなぐ、つまり光・電波融合のための光ファイバ無線・光無線技術とそれをデバイスレベルで支える超高速光電変換技術や機能集積ヘテロジニアス技術、無線区間で超大容量を実現するためのミリ波・テラヘルツ波デバイス技術、周波数軸上での高精度基準と物差しに相当する基準周波数生成・配信技術、などの様々な基盤技術の実現が、未来のネットワーク構築に寄与すると考えられる。

### 3 光・電波融合デバイスのためのヘテロジニアス集積技術

光と電波を融合した集積デバイス技術が、サイバーフィジカル社会を根底で支える基盤技術となる。図2に、デバイス集積化のためのスキームを示す。モノリシック集積は、一般に、単一のメイン材料で構成されることになるが、当然電極等の形成ではサブ材料を利用することになる。結果、1つのメイン材料と複数のサブ材料によって光や電波(電子)のモノリシック集積デバイスは構築される。メイン材料の加工プロセスに強く依存するため、サブ材料の選定は重要である。複数のモノリシック集積デバイスを構築し、それらを光・電氣的に接続することで新しい機能を発現する。

## ヘテロジニアス集積 光・電波融合デバイス

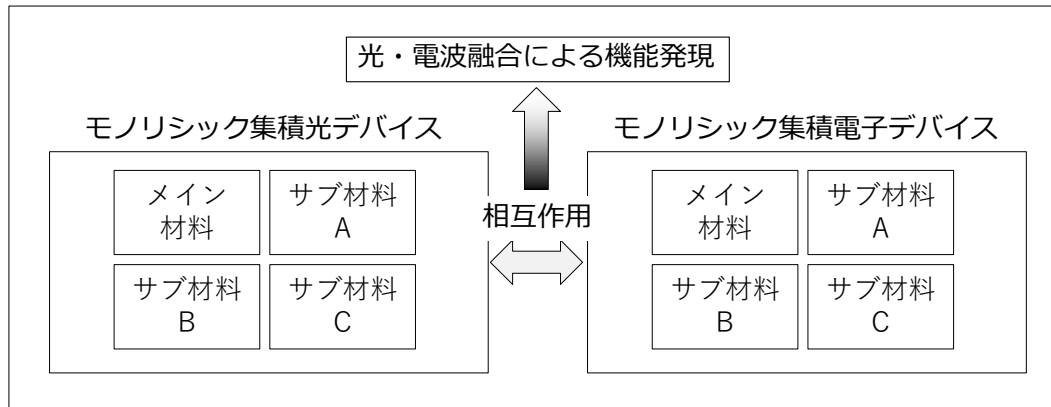
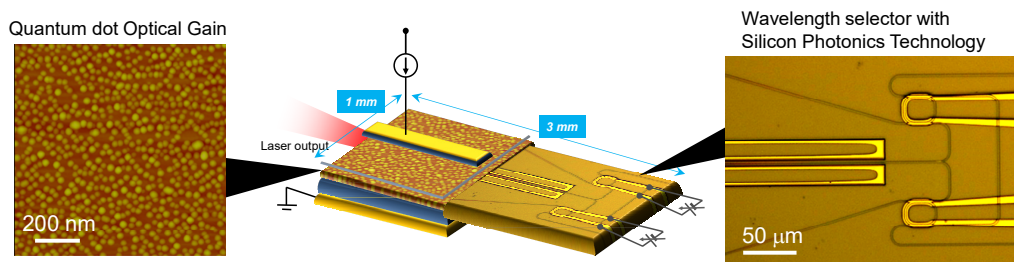


図2 光・電波のモノリシック集積とヘテロジニアス集積技術



## 超小型波長可変量子ドットレーザ

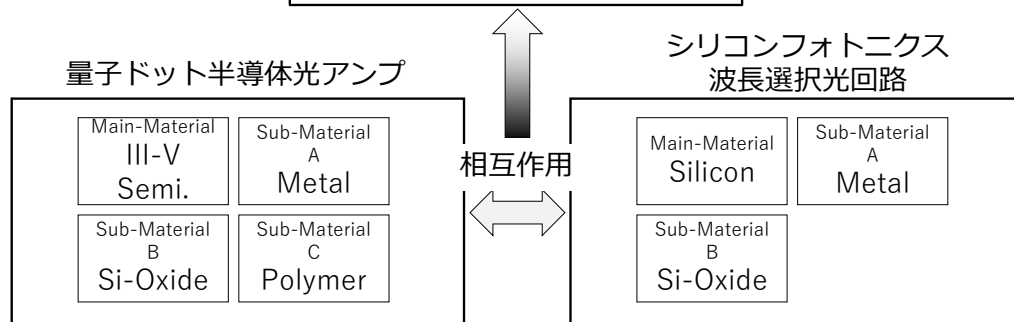


図3 ヘテロジニアス集積による超小型波長可変量子ドットレーザ

これがヘテロジニアス集積デバイスの構築である。例えば、図3にヘテロジニアス波長可変レーザの例を示す。シリコンフォトニクスは、シリコンをメイン材料として、サブ材料には電極用メタル、パッシベーションにはシリコン酸化物が用いられる。これによりパッシブ光回路として、リング光フィルタによる波長選択回路が構成される。一方で、III-V族化合物半導体材料と電極用メタル材料、パッシベーション酸化膜、ポリマー材料を用いることで半導体光アンプを構成することができる。この2つを光学的に接続することで、波長可変レーザとして機能する[4][5]。それぞれ単体のモノリシック光回路では達成できない機能を、異種材料を組み合わせるヘテロジニアス集積技術で創出することが可能となる。また、光アンプ部分などでは量子ドット材料を用いることも可能となり、ヘテロジニア

ス集積デバイスの各要素に当たるモノリシック集積デバイス部分で材料レベルの高度化が可能である[6][7]。

光集積回路の動作波長帯域の検討も進められている。光ネットワークが波長1.5ミクロン帯である理由は、第一に光ファイバの伝送損失が小さいためである。つまり光集積回路での利用を考えたときには、必ずしも1.5ミクロン帯に制限されるものではない。表1に光通信で利用される通信波長帯域と、その帯域で利用可能な周波数帯域を示す。C-bandでは4.4 THzの周波数帯域が利用可能であり、これにより波長多重等を用いた大容量情報通信が実現されている。一方で、T-bandやO-bandなどの短い波長帯域では、70 THz超の非常に広い光周波数帯域が利用できることがわかる。光集積回路内でより多くの波長チャネルを利用することを考えたとき、このようなT+Oバンドの利用は有効であ



#### 4 百折不撓・デバイス研究

表 1 光情報通信のための光周波数帯域

Band	Wavelength (nm)		Frequency (THz)
<b>T-band</b>	<b>1000</b>	<b>1260</b>	<b>58.9</b>
<b>O-band</b>	<b>1260</b>	<b>1360</b>	<b>17.5</b>
E-band	1360	1460	15.1
S-band	1460	1530	9.4
<b>C-band</b>	<b>1530</b>	<b>1565</b>	<b>4.4</b>
L-band	1565	1625	7.1
U-band	1625	1675	5.5

\* T-band (Thousand band)

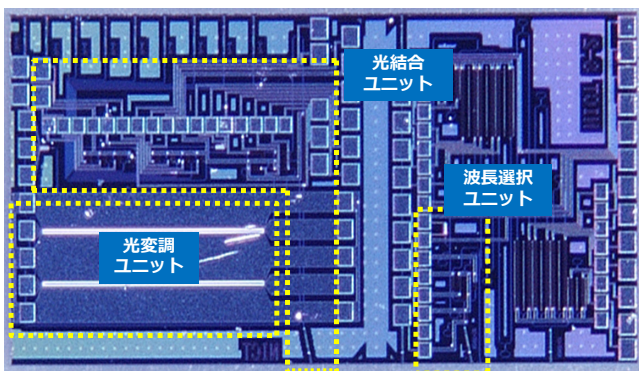


図 4 光・電波集積のためのシリコンフォトニクスチップ

ると考えられる [7]-[9]。実際、シリコンフォトニクス等の光集積回路研究では T + O バンドの短波長域の利用が進められている。

シリコンフォトニクスは、シリコン電子集積回路の加工プロセス技術のノウハウが利用できるメリットがあり、高密度・高集積光デバイスの作製が可能となる。図 4 に光・電波融合デバイスを構成するシリコンフォトニクス光集積回路の一例を示す。光導波路で接続された様々な光回路部品を数 mm サイズの中に高密度に組み込むことができる。この高集積化はシリコン光導波路のコア・クラッド構造の屈折率差が大きいことに起因しており、導波路曲げ半径が小さくできることに依存する。ただし光集積回路のサイズは導波路を流れる光の波長に依存していることから、電子集積回路のスケーリング則に沿うようなダウンサイズが難しい点は注意が必要である。10,000 パーツ/cm<sup>2</sup> 程度の高密度・高集積実装が可能であると見込まれる。リング共振器構造、対称・非対称マッハツェンダー構造、光フィルタ構造、MMI (Multi-Mode Interference) 型光カプラ、方向性結合器などのパッシブ光導波デバイスを中心に、それらを組み合わせることで複雑な光機能集積が期待される。

光集積回路では、光の信号処理以外に電波等の高速

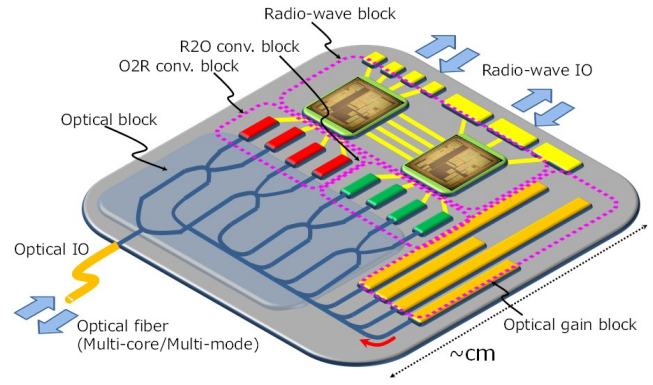


図 5 光・電波融合ヘテロニアス集積デバイス技術

な電気信号を処理する必要がある。しかしながら 1 つの材料で、これら光や高周波電磁波の信号処理に対応する全ての機能をカバーすることは難しい。そのため光と電波、それぞれに有利な材料を用いたデバイスを作製し、1 チップに機能集積することが求められる。つまり材料の特徴・個性を生かした「ヘテロニアス」の発想が重要となる。結果として、ヘテロニアス集積とシリコンフォトニクスの光機能集積を組み合わせることで、将来の光・電波融合デバイスは構成されると考えられ、図 5 にその構成イメージを示す。1 チップ内で光と電波をそれぞれ信号処理すること、さらに光と電波を相互に変換することが求められる。そのため ① RF (Radio Frequency) 回路ブロック、② 光入出力ポート、③ RF 入出力ポート、④ 光ゲインブロック、⑤ 光回路ブロック、⑥ 光・電波変換ブロック、⑦ 電波・光変換ブロックの 7 要素を基本ブロックとして光・電波融合集積デバイスは構成される。各機能ブロックの性能を最大限に発揮するためにヘテロニアスの発想は重要であり、そのため様々な材料の組み合わせが必要となる。材料構成の一例を表 2 として示す。① RF 回路ブロックは、100 Gbaud 級の高速な信号に対応した電気処理を可能とすることが求められる。そのため材料候補としては、Si 以外に、SiGe、化合物半導体、さらにはグラフェンなどの新材料による電子集積回路開発が必要になると考えられる。また、光集積デバイスの動作する帯域と、電子集積デバイスの帯域は根本的に異なり、一般には光デバイスの動作帯域が広い。このため、電子集積デバイスに関しては周波数帯域ごとにパラレル化する方法なども検討する必要がある。② 及び③の光・電気入出力ポートであるが、これは材料的には光ファイバを構成する石英、ポリマー系材料などが用いられ、当然のことながら電子デバイスには金属材料が用いられる。光ファイバは従来のシングルモード光ファイバ以外に、マルチコア・マルチモード光ファイバ、光ファイバリボンなど空間多重に対応した光入出力が必要となる。また RF 入出力では、100

表2 光・電波融合ヘテロジニアス集積デバイスの材料候補

	機能ブロック	材料候補		機能ブロック	材料候補
①	Radio frequency circuit block	Silicon SiGe Compound Semiconductor Graphene	⑤	Optical circuit block	Silicon SiN Compound Semiconductor
②	Optical I/O port	Silica fiber (Multi-core and Multi-mode) Polymers fiber	⑥	Optical to electrical (OE) conversion block	Compound Semiconductor Graphene
③	Electrical I/O port	Metal Carbon nanotube	⑦	Electrical to Optical (EO) conversion block	LiNbO3 Compound Semiconductor Silicon, SiGe Organic Semiconductor
④	Optical gain block	Compound Semiconductor (Quantum well and Quantum dot)			

GHz 超級の広帯域に対応する必要がある、広い帯域に対応したインピーダンス整合及び信号速度の整合、タイミングジッタの解消など、高周波・高速伝送特有の課題が発生する。④光ゲインブロックは、直接遷移型半導体である化合物半導体が中心になると考えられる。量子ドットや量子井戸構造を組み込むことで、量子効率や温度特性の改善につながると期待され、これは半導体レーザに関する研究開発の中で材料技術として高度化されている。⑤光回路ブロックは、光フィルタや干渉系などの光導波路を主体としたパッシブデバイスを意味する。高集積化の観点から、シリコンフォトリクスが中心となる。ただし、シリコンナノワイヤ構造やリブ型光導波路など、シリコン光導波路の種別の選定は、応用に応じて考察する必要がある。⑥光→電波変換ブロックは受光デバイスに相当する。受光デバイスとして、InP や InGaAs 系化合物半導体を用いたフォトディテクタ (PD: Photo Detector) のほかに、シリコンフォトリクスに整合性の高い SiGe/Ge 系半導体を用いたフォトディテクタも有効であると考えられる。さらにグラフェンを用いた高速受光デバイスも候補として考えられる。いずれの受光デバイスにおいても、光・電波融合を前提とするならば、100 GHz 級を超える高い周波数まで応答特性を有することが求められる。そのような高速動作を実現するには、電子のみを信号キャリアとする UTC-PD (Uni-Traveling Carrier Photodiode) 構造が有用となる [10]。一方、高速性と高出力性を同時に実現することは単体のデバイスでは難しい。このためヘテロジニアス機能集積が重要となる。つまり高速な UTC-PD で受けた光信号を、高周波電気アンプで増幅し一体集積する方法である。この方法で単体の PD に比較して、20 dB 近い出力増を得ることが可能となる。一見すると光デバイスと電子デバイスを電極で接続しただけ、と捉えられるかも知れない。しかし 100 GHz 近い高周波信号を扱うときには接続する電極構造自体が導波路として機能してしまい、単純なワイ

ヤーリングでは伝送の損失劣化がおきる。このため光・電波融合デバイスの高効率化のためには、異種材料で構成された光回路と電子回路を接続するための高度な「ヘテロジニアス集積」実装を要することになる。また、光と電波の融合では動作帯域の設計が重要になる。一般に、光デバイスは広帯域であることが多いが、電子集積回路は中心周波数から数 10 GHz 程度の限られた帯域で動作することが多い。このため先述のように光・電波融合デバイスの広帯域化のためには帯域ごとに RF ブロックをパラレル化する必要性も考えられる。⑥電波→光変換デバイスは光変調デバイスに相当する。光変調デバイスを構成する材料は複数あり、高速化に向けて様々な材料を用いたデバイス研究がなされている。広く利用されている材料として、ニオブ酸リチウム (LN) や化合物半導体がある。一方、シリコンフォトリクスとの整合性を考えたときには、Si や SiGe、電気光学ポリマー材料などが検討されている。また光変調では、Electro-absorption (EA) 効果や Pockels 効果を用いることが一般的であるが、光強度変調、光位相変調のどちらを利用するかは応用による。例えば情報通信の場合には、近距離の大容量伝送では PAM 変調が用いられることから強度変調が中心となるが、比較的長距離の光伝送では光 QAM 信号などの光コヒーレント変調が用いられることから強度のほか高精度な光位相変調が必要となる。これらの材料で構成された変調デバイスは 100 Gbaud を超える高い周波数で動作することを目的に研究開発がなされており、材料以外にも構造改善の検討がなされている。例えば、100 ミクロン以下の薄膜化によって LN 光変調デバイスの高周波化が可能となり、300 GHz 近い超高速電波・光応答が観測されている [11]。

ヘテロジニアス集積の魅力は、上記のように①～⑥の機能ブロックごとに最適な材料を選び、最適なデバイス構造を模索できる点にある。さらに、接続性を考慮しつつ機能ブロックをリストアすることで、光・電



## 4 百折不撓・デバイス研究

波集積デバイスとしての性能向上につなげることが可能となる。一方で、機能ブロック間は光・電波信号の導波路等での接続が行われるため最小でサブミクロン以下の実装精度が求められる。高密度ヘテロジニアス集積の実現のためにはこのような高精度かつ多種材料に対応した実装技術が必要となる。高度で多機能な集積デバイスを実現するためには、材料の特性を最大限に生かしたモノリシック集積と、それらを機能ブロックとして異種材料同士を組み合わせるヘテロジニアス機能集積技術が有効となる。このようなヘテロジニアス集積によって構成された機能デバイスは、例えば光・電波融合集積デバイス技術につながる。結果としてヘテロジニアス集積技術は、サイバーフィジカル社会を具現化するための基盤技術になると期待される。

### 4 まとめ

サイバーフィジカル社会を実現するためには「わずかに動くモノ」への大容量情報通信技術が必要になることを述べた。このためには大容量の光ファイバ通信と、mmW/THz波などの大容量無線通信をシームレスに接続する光・電波融合技術が重要となり、その実現に機能集積デバイスが一つの解決策となる。1つの材料で光デバイス、電子デバイスの機能を集積することは困難であるので、異種材料を集積する「ヘテロジニアス集積」の発想が効果的となる。また将来、光波やmmW/THzに加え、量子などのあらゆる「波」の状態を活用したセキュアで大容量な「All-band communication」が技術発展の方向性になると考えられる。

#### 【参考文献】

- 1 山本直克, "Society 5.0時代の大容量情報通信を支える光・電波融合デバイス・システム基盤技術," 光技術コンタクト (Optical and electro-optical engineering contact), vol.61, no.4, pp.18-27, April 2023.
- 2 情報通信研究機構, "Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー," <https://www2.nict.go.jp/di/>
- 3 山中直明 et al., "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イ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 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.
- 5 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.
- 6 N. Yamamoto et al., "Characterization of Wavelength-Tunable Quantum Dot External Cavity Laser for 1.3- $\mu$ m-Waveband Coherent Light Sources," Jpn. J. Appl. Phys. vol.51, p.02BG0, 2012.
- 7 N. Yamamoto et al., "Narrow-line-width 1.31- $\mu$ m wavelength tunable quantum dot laser using sandwiched sub-nano separator growth technique," Optics Express vol.19, Issue 26, pp.B636-B644, 2011.
- 8 N. Yamamoto et al., "Quantum Dot Optical Frequency Comb Laser with Mode-Selection Technique for 1- $\mu$ m Waveband Photonic Transport System," Jpn. J. Appl. Phys., vol.49, p.04DG03, 2010.
- 9 R. Kubo, H. Tsuda, M. Sudo, T. Hajikano, Y. Tomomatsu, and K. Yoshizawa, "Wavelength-Selective External-Cavity Laser Using an Optical Switch Integrated Arrayed-Waveguide Grating for T-band Communications," Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), Th.2.B.4, 2017.
- 10 T. Umezawa et al., "Radio over FSO Communication Using High Optical Alignment Robustness 2D-PDA and its Optical Path Switching Performance," Journal of Lightwave Technology, vol.39, no.16, pp.5270-5277, 2021.
- 11 P. T. Dat et al., "Transparent Relay and Switching of THz-Wave Signals in 285-GHz Band Using Photonic Technology," proceedings of Optical Fiber Communication Conference Th4A.6, 2023.



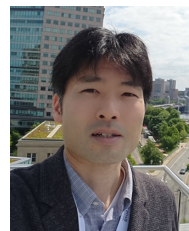
山本 直克 (やまもと なおかつ)

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、光デバイス、光・電波融合  
【受賞歴】

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



松本 敦 (まつもと あつし)

ネットワーク研究所  
フォトリック ICT 研究センター  
光アクセス研究室  
主任研究員  
博士 (工学)  
光デバイス、レーザ、光集積