

3 有線・無線シームレスアクセス技術

3 Seamless Access Technology for Wired and Wireless Communications

3-1 マッシブ集積オールバンド ICT ハードウェアの研究開発

3-1 R&D of Massive Integrated All-band ICT Hardware

松本 敦 赤羽 浩一 山本 直克

MATSUMOTO Atsushi, AKAHANE Kouichi, and YAMAMOTO Naokatsu

近年、様々な分野の技術が進展し、将来のサイバーフィジカル社会の実現が大いに期待されるようになってきている。そのような中、様々な情報処理を行った膨大なデータの高速度・大容量、低遅延通信の重要性が増し、特に中短距離通信ネットワークでは、光ファイバとミリ波やテラヘルツ波を用いたモバイル無線通信においてシームレスな信号転送・接続する光ファイバ無線などの技術を用いた大容量通信ネットワークが重要になる。ミリ波やテラヘルツ波、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路を組み合わせた大容量情報通信や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非常に重要である。

本稿では、1.0~1.6 μm の各波長帯の光やミリ波/テラヘルツ波という多様な伝送メディアとしての「波」を調和的に利用した大規模集積による光・電波融合デバイスの実現に向けて、III-V 族化合物半導体を用いた量子ドット光デバイスの高性能化とシリコンフォトンクスによる光集積回路を用いた異種材料光集積回路に関して、現在の研究開発状況を概説し、将来の展望について述べる。

In recent years, technologies in various fields have advanced, and the realization of the future cyber-physical society has been greatly expected. Under such circumstances, the importance of high-speed, high-capacity, and low-latency communications of massive data processed in various ways has increased. In particular, in moderate range distance communication, high-capacity communication networks using technologies such as radio over fiber that seamlessly transfer and connect signals between mobile wireless communications with millimeter and terahertz waves and optical fibers will become important. Large-capacity information and communications that combine various transmission media such as millimeter, terahertz, and light waves with various transmission paths such as optical fibers and space, and “optical and radio frequency convergence devices” that can process and utilize these within a single chip are extremely important.

In this paper, we outline the current status of R&D for the enhancement of the performance of quantum dot optical devices using III-V compound semiconductors and heterogeneous photonic integrated circuits using silicon photonics, and discuss future prospects with the aim of realizing optical / radio frequency convergence devices through large-scale integration that harmoniously utilizes “waves” as various transmission media, such as light in each wavelength band from 1.0 to 1.6 μm and millimeter/terahertz waves.

1 まえがき

近年の 5G / B5G モバイル通信技術や自動運転、拡張現実や AI 技術の発展、IoT デバイスなどによるセンシングデータの利活用など、様々な分野における技術が進展し、将来的には物理・サイバー空間の融合に

よるサービスの創出、サイバーフィジカル社会の実現といったことが大いに期待されるようになってきている [1]。そのような中、様々な演算・信号処理を行った膨大なデータを高速・大容量、低遅延に通信することが一層不可欠になり、光ファイバとミリ波やテラヘルツ波を用いたモバイル無線通信においてシームレスな

信号転送・接続する光ファイバ無線 [2] などの技術を用いた大容量通信ネットワークが重要になる。このような情報通信ネットワークを構築するために、ミリ波やテラヘルツ波、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や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。さらにそのような膨大なデータ [3] が行きかう通信ではネットワーク機器の消費電力も桁違いに増大するものと考えられている [4]。その観点においても、従来よりも圧倒的に低消費電力で駆動するようなデバイスが求められている。

本稿では、1.0 ~ 1.6 μm の各波長帯の光やミリ波/テラヘルツ波という多様な伝送メディアとしての「波」を調和的に利用した大規模集積による光・電波融合デバイス、すなわちマッシュ集積オールバンド ICT ハードウェアの実現に向けて、要素技術として III-V 族化合物半導体を用いた量子ドット光デバイスの高性能化とシリコンフォトニクスによる光集積回路を用いた異種材料光集積回路に関して、現在の研究開発状況を概説し、将来の展望について述べる。

2 異種材料光集積回路

現在、シリコンフォトニクス (SiPh: Silicon photonics) 技術を用いた超微細な光集積回路 (PIC: Photonic integrated circuit) の研究が盛んにされている [5][6]。これは LSI の作製・製造に用いられる CMOS 製造ラインと相互互換性が高く、極めて効率よく低コスト化が可能であり、また LSI との集積も容易なために、超小型・低消費電力化、電気・光通信の融合が可能となるという点が理由である。しかしながら材料が Si であるため、発光デバイスは実現ができない。通信用の近赤

外波長の半導体レーザーは InP や GaAs といった化合物半導体を用いる必要がある。そのため、Si や化合物半導体を適材適所で使った集積技術 (異種材料集積) の研究が重要である。異種材料集積技術 (HG: Heterogeneous integration) には、端面結合、垂直結合、ウェハ・チップボンディング、マイクロトランスファープリンティング、ヘテロエピタキシーというような様々な方法があるが、我々は端面結合による異種材料集積を採用している [7]。この方法は、III-V 族化合物半導体による RSOA (Reflective Semiconductor Optical Amplifier) や LD (Laser diode) と SiPh-PIC のそれぞれのチップ端面を接続した構造のデバイスである。図 1 は RSOA と SiPh-PIC を端面結合した構造の典型的な異種材料集積回路の写真である。この方法の特徴としては以下のような点がある。

- ・ III-V 半導体デバイスをできるだけシンプルな構造にできる
- ・ 複雑な構造や多数の光要素素子は SiPh-PIC に集約することができる
- ・ 新しい設計の新規レーザー光源を新しいアプリに活用可能
- ・ 波長ロッカー、変調器、フォトレシーバなどをレーザー光源に集積することができる

また、我々はこれまでに III-V 族化合物半導体による量子ドット (QD: Quantum dot) 構造を用いた LD や半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor optical amplifier) の研究開発を行い、高い温度特性や高速動作といった良好な特性を実証してきた [8]-[11]。また、QD 構造により、低位相雑音、高い動作安定性という特性も期待できる。この QD 構造を用いた LD や RSOA/SOA と SiPh-PIC を集積することにより、非常に高性能な PIC の実現が期待される。本節では、高性能光集積回路の実現に向けた各要素技術について概説する。

2.1 量子ドット光デバイスの高性能化

QD 光デバイスと SiPh-PIC を集積した異種材料光集積回路 (HG-PIC) において、QD 光デバイスの高性能化がその特性向上に向けて非常に重要な点である。そこで、QD 光デバイス、特に QD-LD の素子構造の見直しと作製条件・プロセスの変更を行った。図 2 (a) 一般的なリッジ型 FP (Fabry-Perot) 構造 LD の模式図であり、(b) は結晶成長後の加工する前の STEM (Scanning transmission electron microscope) 画像、(c) はレーザーの発光層である活性層の模式図、そして (d) は典型的な QD の AFM (Atomic Force Microscope) 画像をそれぞれ示したものである。作製した QD-FP-LD の光出力特性を図 3 (a)、レーザー発振スペクトルを図 3 (b) に示す。図 3 (b) に示したように、1.55 μm 帯でのレー

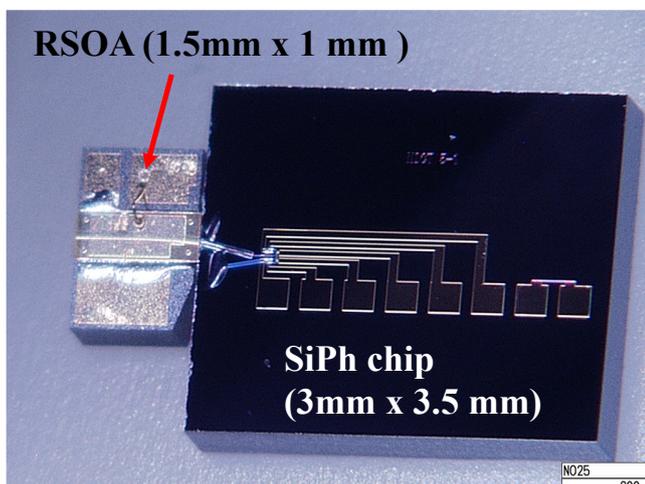


図 1 RSOA と SiPh-PIC を端面結合した構造の典型的な異種材料集積回路

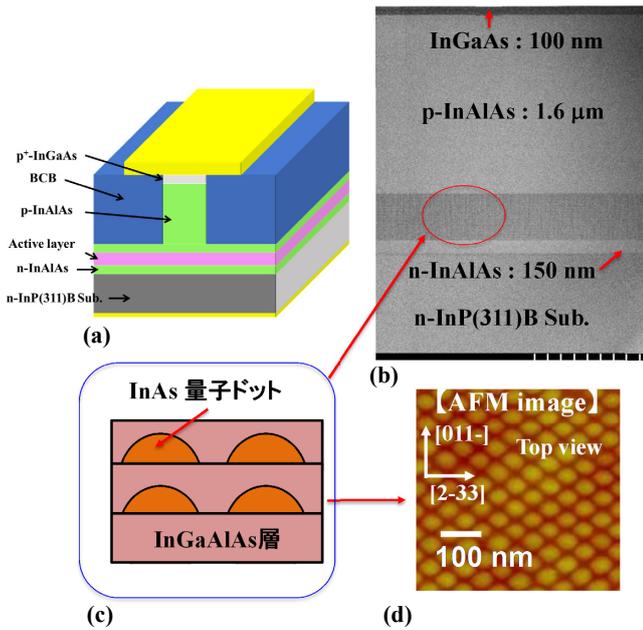


図 2 (a) 一般的なリッジ型 FP-LD の模式図、(b) 結晶成長後の STEM 画像、(c) レーザの活性層模式図、(d) 典型的な QD の AFM 画像

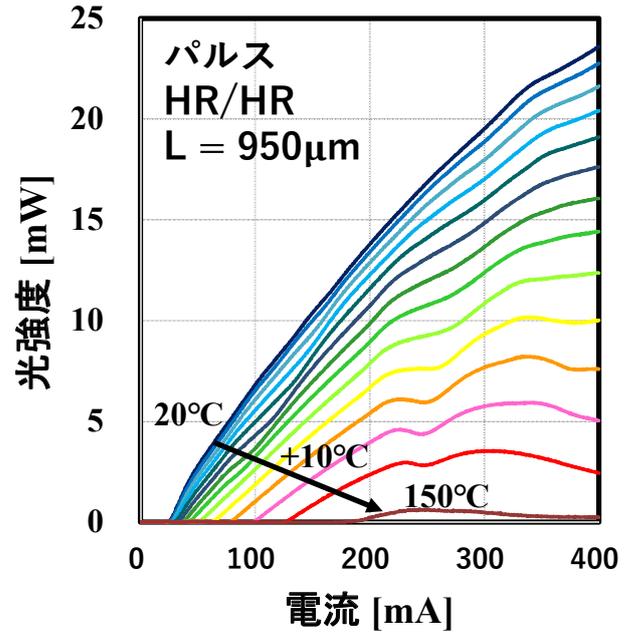


図 4 QD-FP-LD のパルス動作時における光出力特性の温度依存性

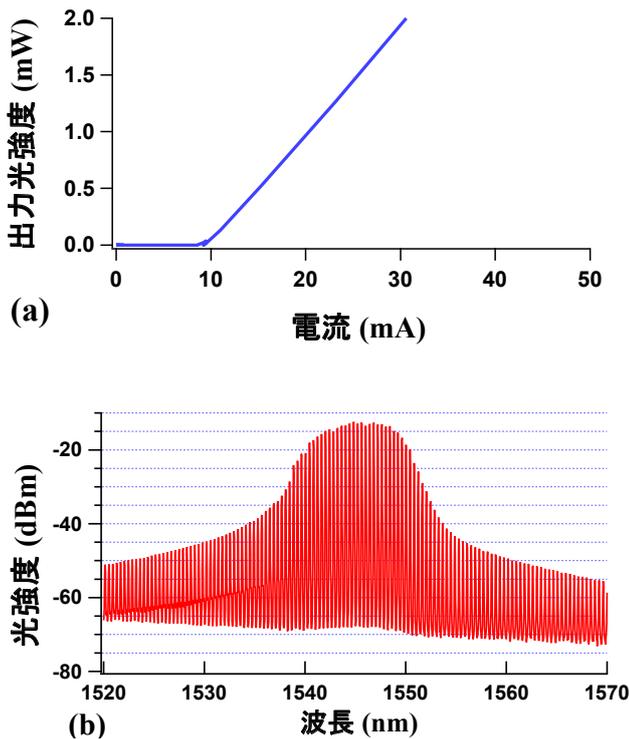


図 3 (a) 新たに試作した QD-FP-LD の光出力特性と (b) レーザ発振スペクトル

ザ発振を確認し、^{しきい値} 閾値電流は図 3 (a) に示したように 9.5 mA と非常に小さな値での室温連続発振 (CW) 動作を実現した。この閾値電流は端面出射型 1.5 μm 帯 QD-LD では世界最小であり、低消費電力な特性を実現することができた [12]。また図 4 はパルス動作時における光出力特性の温度依存性を示したものである。

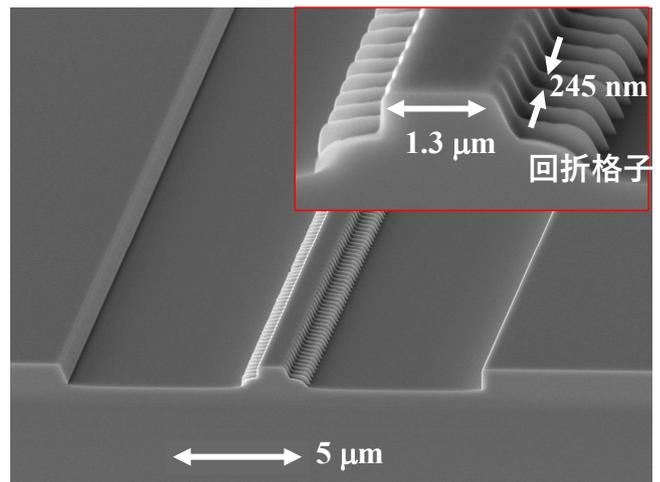


図 5 新たに試作した QD-DFB-LD の SEM 画像

150 °C までのレーザ発振動作を実証し、非常に高い温度安定性であった。その指標となる特性温度 T_0 の値は室温から 50 °C までの温度領域では ∞ であり、世界最高クラスの温度特性が得られた [13]。これらの結果は従来の我々の報告してきた結果を大きく向上するものとなった。

次に単一波長でレーザ発振動作する QD-DFB-LD (DFB: Distributed feedback) について示す。今回、一般的な回折格子の構造ではなく、光導波路側面に回折格子を形成した構造を採用した。図 5 はその SEM 画像である。図 5 に示したように 245 nm 周期の微細構造を非常に良好な形状に加工し作製することができていることが分かる。図 6 はこの QD-DFB-LD のチップを 16 ピンバタフライパッケージに実装した写真であ

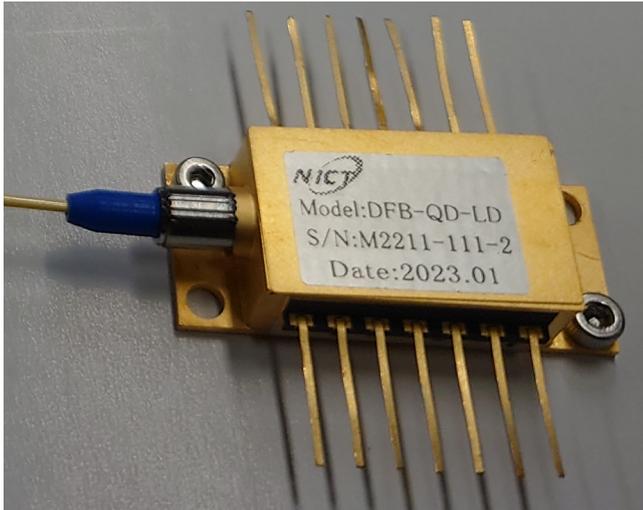


図6 QD-DFB-LDのチップを実装した16ピンバタフライパッケージ

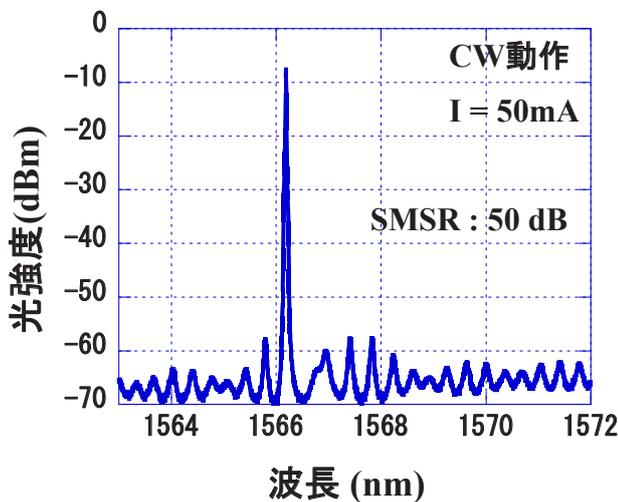


図7 QD-DFB-LDに直流電流を50 mA流した時のレーザ発振時の出力光スペクトル

る。図7は直流電流を50 mA流した時のレーザ発振時の出力光スペクトルである。サイドモード抑圧比 (SMSR: Side mode suppression ratio) は50 dBであり、非常に良好な単一モード性を得ることができた。またこのQD-DFB-LDにおいても閾値電流は小さく、CW室温発振時の閾値電流は、 $I_{th} = 15.0$ mAであった [14]。以上に示したように、QD-FP-LDやDFB-LDの特性を大幅に向上することに成功した。これにより、SiPhチップとのHG-PICの特性に関してもさらに向上させることができ、その高機能・高性能化が期待される。

2.2 異種材料集積波長可変レーザ

次にQD-RSOAとSiPh-PICチップの端面接合型の集積デバイスである1.5 μm 帯波長可変レーザを紹介する [15]。上述したように1.5 μm 帯のQD構造を有するRSOAについても一般的な従来構造のRSOAと比較し、高い特性が期待される。

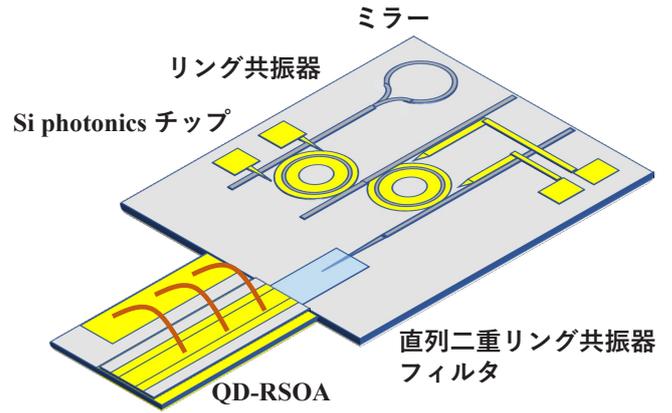


図8 QD-RSOAと波長選択フィルタとして直列二重リング共振器を作製したSiPhチップによる波長可変レーザの模式図

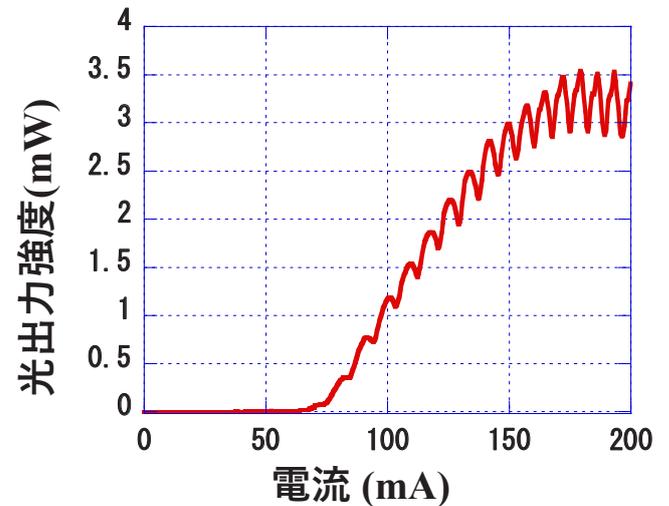


図9 異種材料集積型の波長可変レーザにおける注入電流と出力光強度の関係

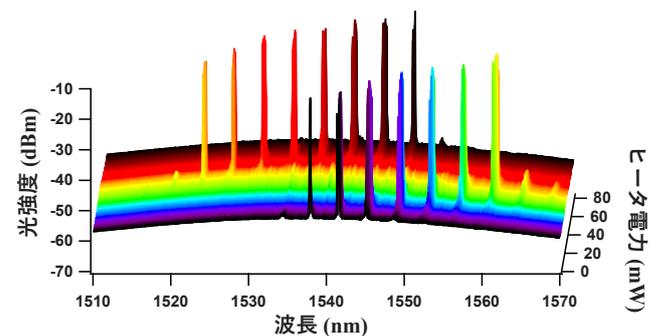


図10 異種材料集積型の波長可変レーザにおいて、QD-RSOAへの注入電流を80 mAとした場合で、1つのリング共振器のヒータを駆動した時における光スペクトル

図8はQD-RSOAと波長選択フィルタとして直列二重リング共振器を作製したSiPhチップによる波長可変レーザの模式図である。SiPhチップ側で選択した波長の光がミラーを介してRSOAに戻る外部共振器型の構成であり、QD-RSOAで閾値利得を超える電流を注入することでレーザ発振する。直列二重リング共振器では、2つのリング共振器の共振器長を微妙に異な

る長さに設計することによってバーニア効果を利用することができ、それにより任意の単一波長を選択し、大きな波長可変範囲を得ることができる。波長可変動作としては、2つのリング共振器上にはマイクロヒータが装荷されており、そのヒータによりリング共振器を加熱し、屈折率を制御することによってレーザー発振波長を制御する。

図9、10はそれぞれこの異種材料集積型の波長可変レーザーにおける注入電流と出力光強度の関係(I-L特性)と QD-RSOA への注入電流を 80 mA で一定とした状態において、1つのリング共振器のヒータを駆動した場合における発振波長の変化を示した光スペクトル

である。この時の閾値電流は約 65 mA であり、飽和出力光強度は約 3 mW であった。I-L 特性でリップルが見られるのはモードホップが生じているためと考えられる。レーザー発振スペクトルから SMSR は 35 dB 以上得られており、十分良好な単一モード性が得られた。この素子の波長可変範囲としては 40 nm であり、ほぼ C-band 通信波長帯全域をカバーするような特性が得られた。波長可変範囲は QD-RSOA の利得帯域幅と SiPh チップ内の二重リング共振器型波長選択フィルタによって設計することができるため、更なる帯域幅の拡大も可能である。

3 光集積回路の大規模化

シリコンフォトニクスにより高密度・高集積光回路の作製が可能である。図11に一例として示した PIC は、多チャンネル送信器デバイスとして異種材料集積に用いる SiPh-PIC の顕微鏡写真である。光導波路で接続された様々な光素子・構成要素部品を数 mm サイズのチップ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フォトニクスにおけるシリコン光導波路のコアとクラッド層の屈折率差が大きいことに起因しており、光導波路曲げ半径を小さくさせられることによる。ただし PIC のサイズは光導波路を伝搬する光の波長と屈折率差に依存していることから、LSI のスケール則に沿うようなダウンサイズは難しいと考えられる。リング共振器、対称・非対称マッシュエンダー、光フィルタ、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路デバイスを中心に、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。

将来的な光電融合光集積回路では、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、異種材料集積の観点が一層重要になる。図12は III-V 族化合物半導体の QD-LD/SOA、超高速 PD・二次元アレイ PD [16] [17]、強誘電体材料の超高速 LN 光変調器 [18]、SiPh-PIC といった NICT で研究が進む超高性能なデバイス技術からなる異種材料集積 PIC を想定した模式図である。この図に示したような異種材料 PIC にさらに光/電気・電気/光変換部、光電入出力、III-V アクティブ、光回路、というような各種機能ブロックが構成され、高密度・大規模集積の高機能光・電波融合デバイスは光とミリ波/テラヘルツ波などの高周波無線をチップ内でシームレスに接続・相互変換し、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。

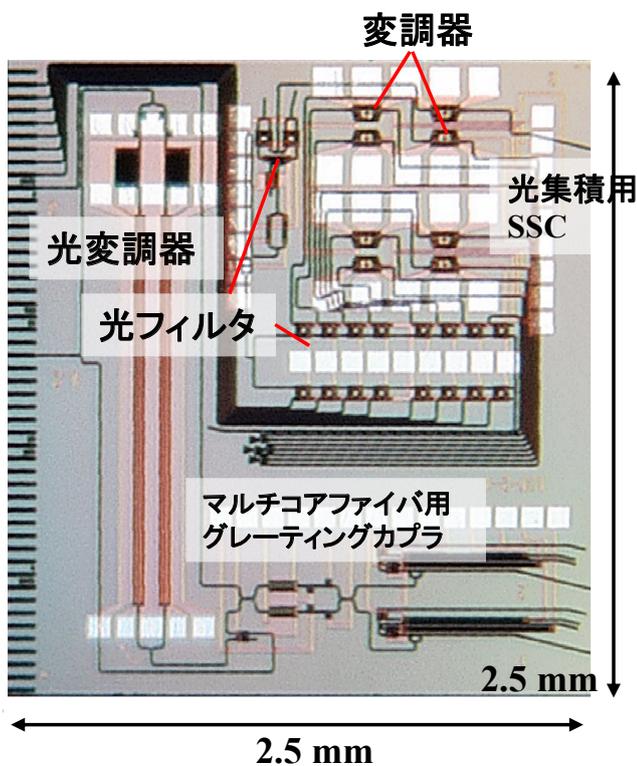


図11 多チャンネル送信器デバイスとして異種材料集積に用いる SiPh-PIC の顕微鏡写真

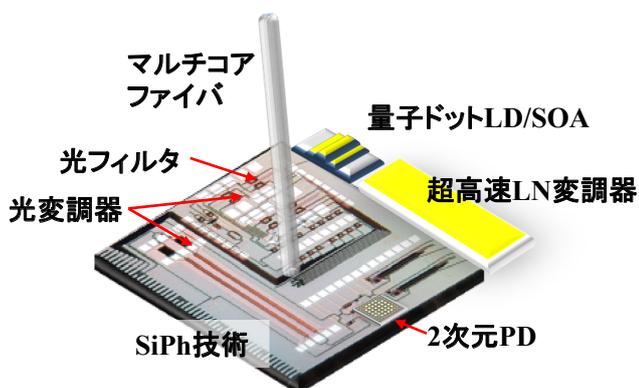


図12 III-V 族化合物半導体の QD-LD/SOA、強誘電体材料の LN 光変調器、SiPh-PIC からなる異種材料集積 PIC の模式図

4 まとめ

本稿では、各波長帯の光、ミリ波／テラヘルツ波という多様な伝送メディアとしての「波」を調和的に利用した大規模集積による光・電波融合デバイスに向けて、III-V 族化合物半導体を用いた量子ドット半導体レーザーの高性能化に成功し、その特性を示した。また、QD-RSOA とシリコンフォトニクスによる異種材料集積デバイスにおける波長可変光源としての機能実証の結果についても示した。今後、異種材料光集積技術の重要性は更に高まり、光・電波融合デバイスがサイバーフィジカル社会の基盤技術になると期待される。

謝辞

本研究の一部は、総務省の「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」(JPJ000254)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(JPNP20017)の一環として実施され、また先端 ICT デバイスラボの設備・協力により実施された。

【参考文献】

- 総務省、令和 2 年版 情報通信白書, 2021.
- 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.
- 総務省、令和 3 年版 情報通信白書, 2022.
- JST 低炭素社会戦略センター, "情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2)," 2022.
- T. Shi, T.-I. Su, N. Zhang, C.-Y. H0ong, and D. Pan, "Silicon Photonics Platform for 400G Data Center Applications," *Proc. OFC2018*, M3F.4, 2018.
- A. Malik, O. Guo, M. A. Tran, G. Kurczveil, D. Liang, and J. E. Bowers., "Widely tunable, heterogeneously integrated quantum-dot O-band lasers on silicon," *Photon. Research*, 8, 10, 1551, 2020.
- 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.
- 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.
- 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.
- K. Akahane, N. Yamamoto, and M. Tsuchiya, "Highly stacked quantum-dot laser fabricated using a strain compensation technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, pp.041121, 2008.
- 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, 2017.
- A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, S. Nakajima, N. Yamamoto, and A. Kanno, "Low Threshold 1.55 μ m-Band Quantum Dot Laser Diode with InP(311)B Substrate," *Proc. ISLC2022*, TuP-20, 2022.
- R. Yabuki, A. Matsumoto, R. Katsuhara, S. Heinsalu, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, "Temperature-Insensitive pulse and 120°C CW Operation of 1550nm-Band p-doped InAs/InGaAs Quantum Dot Lasers on InP(311)B Substrate," *Proc. OFC2023*, Th2A.6, 2023.
- 松本 敦, 中島 慎也, 勝原 龍海, 矢吹 諒太, 梅沢 俊匡, 松島 裕一, 宇高 勝之, 赤羽 浩一, "1.55 μ m 帯量子ドット DFB レーザの低閾値化," 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-B409-5, 2023.
- A. Matsumoto, W. Masuda, K. Akahane, T. Umezawa, N. Yamamoto, and T. Kita, "1.55- μ m Si-Photonics-Based Heterogeneous Tunable Laser Integrated with Highly Stacked QD-RSOA," *Proc. CLEO2021*, SM1H.5, 2021.
- T. Umezawa, A. Kanno, K. Kashima, A. Matsumoto, K. Akahane, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Bias-free operational UTC-PD above 110 GHz and its application to high baud rate fixed-fiber communication and W-band photonic wireless communication," *J. Lightwave Technol.*, vol.34, no.13, pp.3138–3147, 2016.
- T. Umezawa, Y. Yoshida, A. Kanno, A. Matsumoto, K. Akahane, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "FSO Receiver with High Optical Alignment Robustness Using High-Speed 2D-PDA and Space Diversity Technique," *J. Lightwave Technol.*, vol.39, no.4, pp.1040–1047, 2021.
- P. T. Dat, Y. Yamaguchi, M. Motoya, S. Oikawa, J. Ichikawa, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Transparent Fiber-Millimeter-Wave-Fiber System in 100-GHz Band Using Optical Modulator and Photonic Down-Conversion," *J. Lightwave Technol.*, vol.40, no.5, pp.1483–1493, 2022.



松本 敦 (まつもと あつし)

ネットワーク研究所
フォトニック 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



赤羽 浩一 (あかはね こういち)

ネットワーク研究所
フォトニック ICT 研究センター
光アクセス研究室
室長 /
ネットワーク研究所
先端 ICT デバイスラボ
副ラボ長
博士 (工学)
化合物半導体結晶成長、光デバイス
【受賞歴】
2012 年 E-MRS Best Poster Award 受賞
2007 年 応用物理学会 講演奨励賞 受賞



山本 直克 (やまもと なおかつ)

ネットワーク研究所
フォトニック 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