

# 異種材料集積を用いた 低消費電力波長可変レーザ

Low Power Consumption Tunable Lasers with Heterogeneous Material Integration

平谷 拓生\*

Takuo Hiratani

井上 尚子

Naoko Inoue

菊地 健彦

Takehiko Kikuchi

新田 俊之

Toshiyuki Nitta

藤原 直樹

Naoki Fujiwara

八木 英樹

Hideki Yagi

IoT技術を用いた様々なアプリケーションの進展により通信量が増大し、2030年にはデータレートが10 Tb/sを超えると予想されている。一方、光通信を支えてきた単一材料光デバイスにおいては10 Tb/s級のデータ伝送に向けた広帯域化と低消費電力化の両立に限界が見え始めており、技術的なブレイクスルーが求められている。高速・高効率動作に優れたIII-V族化合物半導体と素子の小型化による高密度集積が可能なシリコン (Si) フォトニクスそれぞれの利点を組み合わせた異種材料集積光デバイスは、その有望なアプローチの一つとして期待されている。本稿では異種材料集積を利用した波長可変レーザについて報告する。

The development of various IoT applications is accelerating data traffic, and it is anticipated that a data rate of more than 10 Tb/s will be required by 2030. On the other hand, conventional single-material photonic device technologies supporting optical communications seem to have limitations to achieve both high-speed operation and low power consumption for 10 Tb/s-class data transmission. To overcome this challenge, heterogeneous integration, which combines the advantages of III-V compound semiconductors for high-speed and high-efficiency operation and Si photonics for high-density integration through device miniaturization, is expected as one of the promising approaches. This paper reports wavelength tunable lasers using heterogeneous integration.

キーワード：異種材料集積、波長可変レーザ、シリコンフォトニクス、接合技術

## 1. 緒 言

自動運転や遠隔医療、スマートシティ、スマート農業など多岐にわたるIoT<sup>\*1</sup>アプリケーションが提案され、実現に向けた取り組みが進められている。従来に比べ様々な「モノ」がインターネットに接続されることで利便性が大きく向上する一方で、それを支える光通信にはさらなる技術の向上が必要とされる。このような背景の中、スマート社会実現に向けた通信網の一つとして、第5世代移動通信システム (5G) が既に導入され、さらにその先の6Gと呼ばれるモバイルシステムが検討されている。これに伴い、アクセスネットワークやデータセンタネットワークについてもこれまで以上の情報伝送量が求められることとなる。データ伝送を行う光トランシーバに要求される伝送速度は2025年には1 Tb/sを超え、2030年には10 Tb/s級に達すると予想されている。

これまでに光通信システムには、III-V族化合物半導体<sup>\*2</sup>から成るInP系モノリシック集積素子<sup>(1)</sup>やシリコン (Si) フォトニクス<sup>\*3</sup>素子<sup>(2)</sup>が用いられてきたが、10 Tb/s級のデータ伝送実現は、現状、単一材料素子では困難であり、多チャンネル化により伝送量を増加させることが一つの方法となる。伝送量の面で利点は大きいですが、素子の大型化、コストの増加、消費電力の増大等が懸念される。最新のデバイス技術を用いた800 Gb/sの伝送速度に対応した小型・低消費電力トランシーバを使用した場合でも16チャンネルが必要となり、消費電力は300 Wを超えると試算され、抜

本的な消費電力の低減が必要である。このように従来の光通信を支えてきた単一材料光デバイスでは、高速動作と低消費電力の両立に限界が見えてきており、技術的なブレイクスルーが求められている。

III-V族化合物半導体とSiフォトニクスのそれぞれの利点を組み合わせた異種材料集積光デバイスは、その有望なアプローチとして期待されている。従来の単一材料光デバイスで主に用いられるInP系材料などのIII-V族化合物半導体は高速・高効率動作に優れており、Siフォトニクスにより高密度に集積することで、伝送容量の大容量化が可能となる。さらに、それぞれの利点を生かした設計を行うことで、単一材料素子を超える高効率・低消費電力な動作が期待される<sup>(3),(4)</sup>。本稿では、InP系利得領域とSiフォトニクスを用いた波長フィルタをウエハ接合により集積した波長可変レーザについて報告する。

## 2. 異種材料集積技術

III-V族化合物半導体とSiフォトニクスを組み合わせた異種材料集積の取り組みは数多く報告されており、その集積手法についても様々な方法が提案されている。代表的なIII-V族化合物半導体とSiフォトニクスを用いた異種材料集積技術を表1にまとめた。

端面結合型<sup>(5)</sup>はIII-V族化合物半導体チップとSiフォトニクスチップの端面を突き合わせる形で集積するものであ

表1 III-V 族化合物半導体とSiフォトニクスを組み合わせた異種材料集積技術

|                     | 端面結合 | マイクロトランスファープリンティング | ウエハ/小片接合 |
|---------------------|------|--------------------|----------|
| 高密度集積               | ✓✓   | ✓✓✓                | ✓✓✓      |
| 位置合わせ精度             | ✓✓   | ✓✓                 | ✓✓✓      |
| III-V族化合物半導体部の作製容易さ | ✓✓✓  | ✓✓                 | ✓✓       |

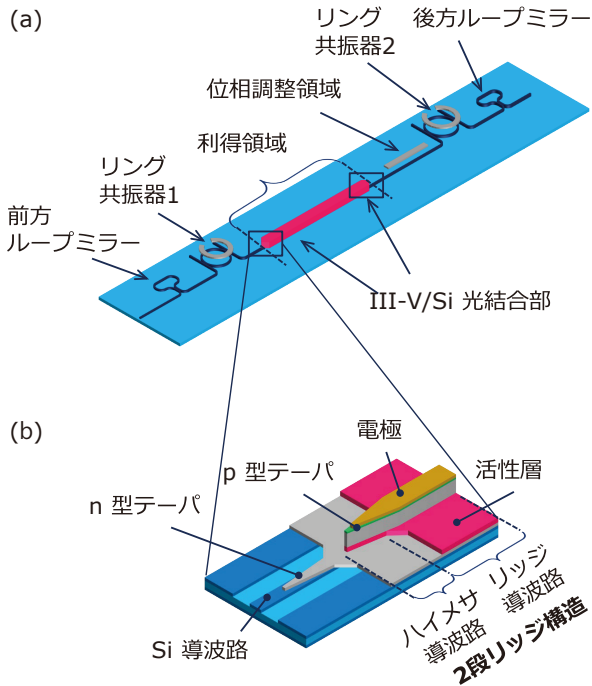


図1 ウエハ接合を用いたInP/Si接合集積波長可変レーザの (a) 概要図と (b) InP/Si光結合部構造

る。それぞれのチップを個別に作製できるため、III-V族化合物半導体素子の作製は従来通りの手法を用いることができる。一方で、III-V族化合物半導体素子の実装時の位置ずれによる損失や反射などの課題が挙げられる。

マイクロトランスファープリンティング<sup>(6)~(8)</sup>は、III-V族化合物半導体ウエハ上に作製した素子をピックアップし、Siフォトニクスウエハ上の所望の位置に接合する技術である。様々なIII-V族化合物半導体を用いた素子を接合でき、高密度集積も可能であるが、接合時の位置ずれに課題がある。

ウエハ/小片接合技術<sup>(4), (9), (10)</sup>はIII-V族化合物半導体のウエハまたは小片をSiフォトニクスウエハ上に接合し、後から素子の加工を行うことで集積素子を作製するものである。異なる種類のIII-V族化合物半導体薄膜を用いることで、様々な機能を持つ素子を1チップ内に高密度に集積することも可能となる。この方法では、フォトリソグラフィによるパターンングで位置合わせ精度が決まるため、他の2種類の方法と比較して高い位置精度が得られる。その結

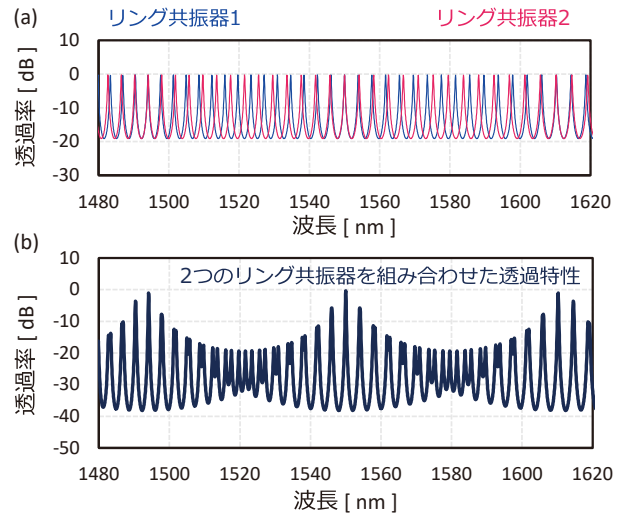


図2 (a) リング共振器1とリング共振器2のフィルタ透過特性と (b) 2つのリング共振器を組み合わせたフィルタの透過特性

果、両者の導波路位置ずれによる光結合損失を低減することができるため、III-V族化合物半導体/Si間で高い光結合効率が得られるのが特長である。一方で、Siフォトニクスウエハ上に接合後、半導体加工を行うため、Si加工とIII-V族化合物半導体加工の両方の知識・技術が必要となる。

以上のように様々な異種材料集積技術が報告されているが、当社では高密度集積、位置合わせ精度の観点で優れているウエハ/小片接合技術を用いた異種材料集積光デバイスに着目し検討を行った。

### 3. InP/Si接合集積波長可変レーザ

図1 (a) にウエハ接合を用いたInP/Si接合集積波長可変レーザの概要図を示す<sup>(11)</sup>。光を発するInP系の利得領域とSi導波路で作製したループミラー<sup>\*4</sup>やリング共振器<sup>\*5</sup>を組み合わせた構成である。InP系利得領域はリッジ導波路<sup>\*6</sup>を用いており、Si導波路幅により活性層への光閉じ込め係数を変化させることができる<sup>(12)</sup>。また、図1 (b) に示すようにInP系利得領域とSi導波路との光結合のため、p型テーパーとn型テーパーの2段テーパー構造としている<sup>(13), (14)</sup>。p型テーパーについては、リッジ導波路とハイメサ導波路<sup>\*7</sup>の2種類を用いた2段リッジ構造としている。本構造を用いることにより光結合損失および波長依存性の低減が可能である<sup>(12)</sup>。図2に2つのリング共振器の透過スペクトルとそれらを組み合わせたフィルタの透過スペクトルを示す。共振波長間隔がわずかに異なる2つのリング共振器を組み合わせることで、これら2つの共振波長間隔から決まるモード間隔でそれぞれの共振波長が一致しピークとなるバーニア効果を用いている。このモード間隔を広くとり、それぞれのリング共振器上に集積したマイクロヒータによる熱光学効果を用いて共振波長をシフトさせることで、広い波長範囲で所望の波長を出力できる。

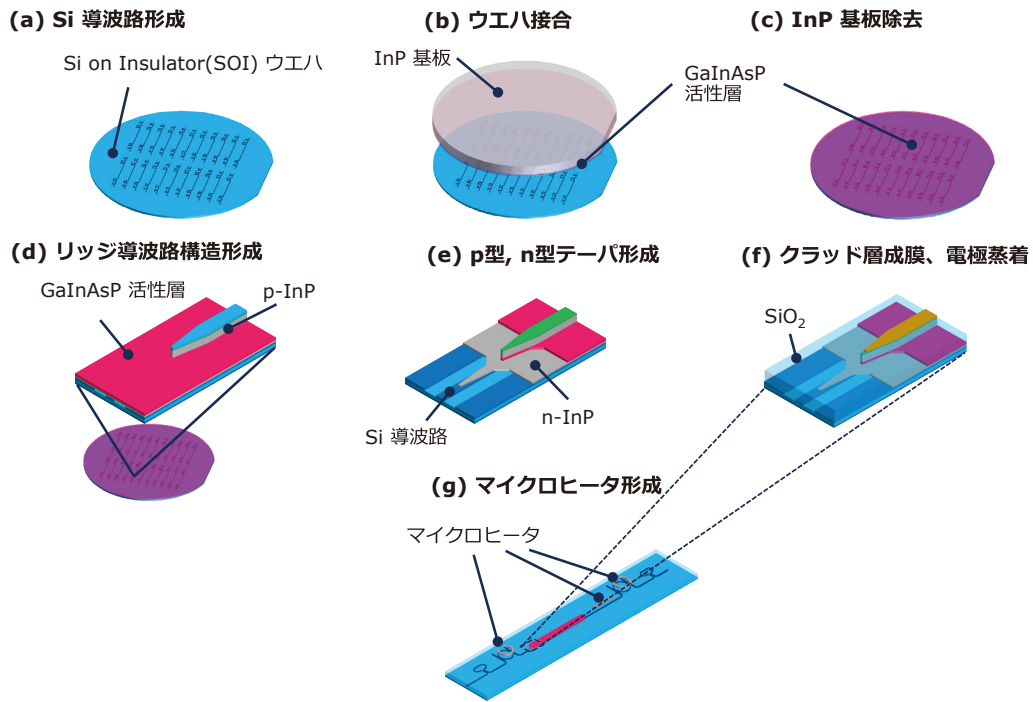


図3 InP/Si 接合集積波長可変レーザの作製フロー

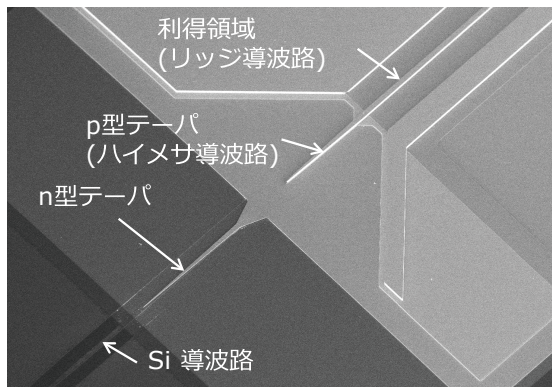


写真1 試作した素子のInP/Si光結合構造

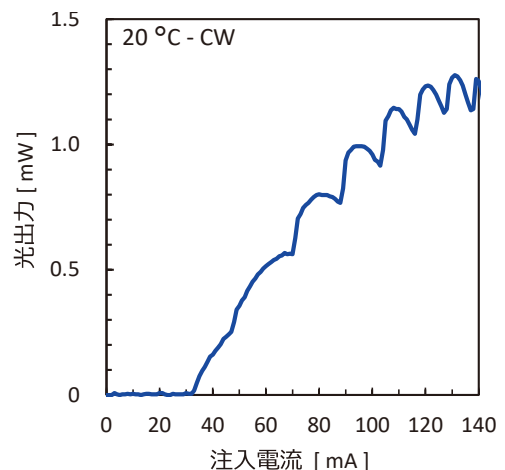


図4 試作素子の電流-光出力特性

図3にInP/Si接合集積波長可変レーザの作製フローを示す。まず、Si on insulator (SOI) ウエハ上にSi導波路を形成する。次に、InP基板上に発光層となるGaInAsP多重量子井戸 (MQW) 層を含むレーザ構造を結晶成長したウエハを準備し、Si導波路を作製したSOIウエハと直接接合を行う。薬液等を用いてInP基板を除去することにより、Si導波路上にInP系の発光層が接合された状態となる。その後、フォトリソグラフィによるパターン形成およびドライエッチング等による半導体加工を行うことで、利得領域のリッジ導波路構造および光結合構造である2段テーパ導波路を形成する。最後に、SiO<sub>2</sub>上部クラッド層を成膜し、利得部の電極形成、リング共振器および位相調整部のマイクロヒータ形成を行う。試作した素子の光結合構造の電子

顕微鏡写真を写真1に示す。Si導波路上に2段リッジ構造を含む2段のテーパ導波路構造が形成されていることが確認できる。

#### 4. 試作素子の特性

##### 4-1 波長可変レーザの特性

試作したInP/Si接合集積波長可変レーザについて、ダイシングにより端面形成を行い、評価を行った。Si外部共振器長2.5 mm、利得領域長1.1 mmの素子の電流-光出力特性を図4に示す。20℃連続動作において、しきい値電流32

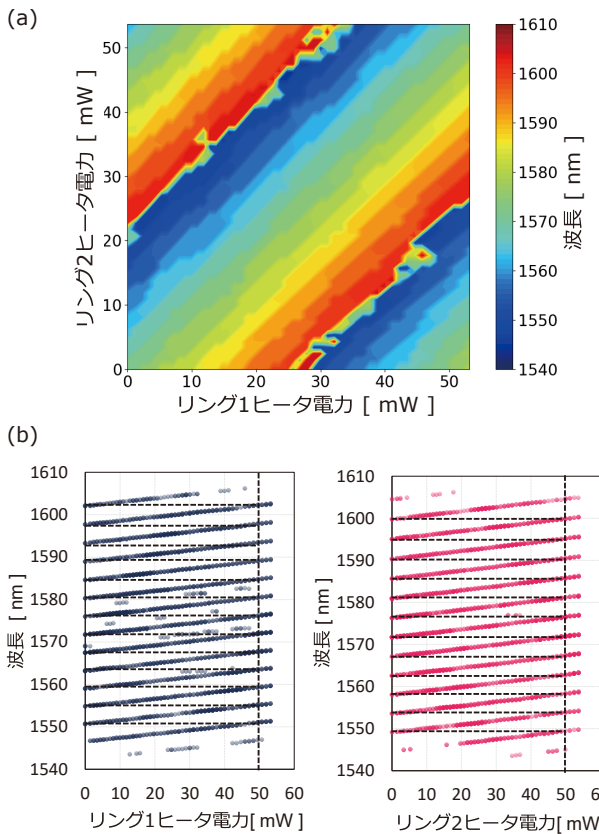


図5 (a) 2つのリング共振器のヒータ注入電力に対する発振波長マップと (b) それぞれのリング共振器へのヒータ注入電力に対する発振波長

mA、最大光出力1.3 mWが得られた。光出力特性に見られるキックは、利得領域への電流注入で位相が変化しモード飛びが生じたことによるもので、このタイプのレーザに見られる現象であり、使用時の動作に問題はない。

図5 (a) に2つのリング共振器のヒータ注入電力に対する発振波長マップを示す。2つのリング共振器への注入電力を制御することで、バーニア効果による広い波長可変範囲が得られている。位相調整部の制御による共振器モード調整も組み合わせることで広い波長可変範囲で擬似連続波長掃引動作が可能である。図5 (b) にはそれぞれのリング共振器への注入電力に対する発振波長を示す。それぞれのリング共振器へのヒータ注入電力が50 mW以下、すなわち、総注入電力としては100 mW以下で、擬似連続波長掃引動作が可能である。

図6に各ヒータ注入電力を調整し擬似連続波長掃引動作を行った際の重ね合わせたスペクトルを示す。副モード抑圧比 (SMSR) が41 dB以上の単一モード動作で56.2 nmの広い波長可変範囲が得られている。広い波長範囲で光出力の変化が小さく安定した動作となっているのは、InP/Si光結合構造として、動作波長内で光結合効率の変化が小さい2段リッジ導波路を含む2段テーパ導波路構造としたことが寄与していると考えられる。

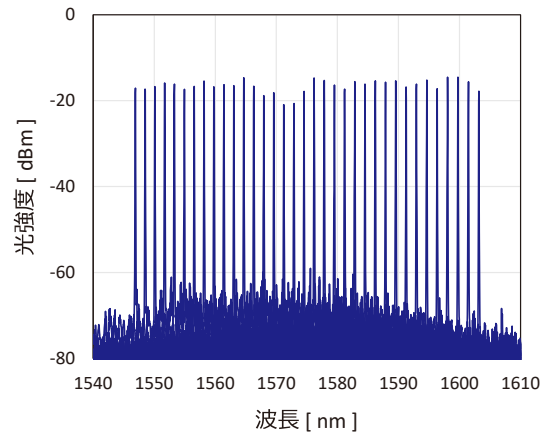


図6 擬似連続波長掃引動作時のスペクトルの重ね合わせ

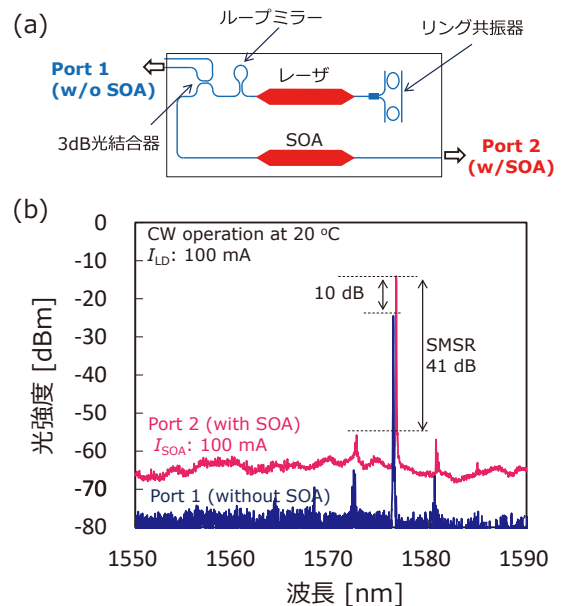


図7 (a) SOAを集積した波長可変レーザの構成と (b) スペクトル特性

#### 4-2 SOA集積波長可変レーザの特性

図7 (a) にSOA<sup>※8</sup>を集積した波長可変レーザの構造を示す<sup>(12)</sup>。図3で示した作製フローで試作しており、レーザとSOAの利得領域は同一の活性層構造を用いている。波長可変レーザの光出力を3 dB光結合器により1 : 1に分岐しており、Port 1からはSOAを通さない光出力が得られ、Port 2からはSOAを通した光出力を得ることができる。

図7 (b) に波長可変レーザを100 mAで駆動した状態で、SOAに100 mAの電流を注入した際のPort 1およびPort 2のスペクトル特性を示す。SMSR41 dBの単一モード動作が得られており、Port 2とPort 1の光出力差は発振波長のピーク強度で10 dBが得られた。これらの結果は、Si導波路上にIII-V族化合物半導体素子の多機能集積を実現する上で本手法が有望であることを示すものである。

## 5. 結 言

本稿では将来の情報伝送量増大に対応するための一つの方法として、III-V 族化合物半導体と Si フォトニクスを組み合わせた異種材料集積技術を用いた光デバイスについての検討結果を報告した。高密度集積、高光結合効率の観点で利点があるウエハ接合技術により 2 段リッジ構造を有する InP/Si 接合集積波長可変レーザを試作し、波長可変幅 56.2 nm の動作を実現した。これは、Si フォトニクスを用いた光回路における光源として有望であることを示している。また、同一ウエハ上に SOA を集積した波長可変レーザにおいて、SOA による波長可変レーザの光出力の増幅が得られた。本技術は光源だけではなく様々な機能素子への展開が可能であり、これらを Si フォトニクス光回路上に高密度に集積することで、将来の光伝送を支える新たな光デバイス技術となることが期待される。

## 6. 謝 辞

この成果は、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) の委託業務 (JPNP14004) の結果得られたものです。

## 用語集

### ※1 IoT

Internet of Things: モノのインターネットと呼ばれ、これまでにインターネットにつながっていなかった様々なモノがインターネットに接続され相互に通信を行う仕組み。

### ※2 III-V 族化合物半導体

III 族元素および V 族元素を用いた半導体。直接遷移型という特徴により高効率な発光が可能で、レーザなどの光源として用いられる。

### ※3 シリコン (Si) フォトニクス

Si 基板上に微細加工技術を用いて、様々な光デバイスを集積可能とする。Si 導波路は大きな屈折率差により強い光閉じ込めが得られ、小型化、高密度集積に優れる。

### ※4 ループミラー

光導波路で形成した反射器。方向性結合器などの光結合器により分波した光を再度ループにより戻すことで反射器として機能する。

### ※5 リング共振器

リング状の光導波路と方向性結合器などの光結合器を組み合わせた素子。リングの周長に対応した共振波長間隔で共振する。

### ※6 リッジ導波路

Shallow ridge と呼ばれる導波路構造で、コア層となる活性層上部のクラッド層を矩形に加工することで光を閉じ込めている。

### ※7 ハイメサ導波路

Deep ridge と呼ばれる導波路構造で、上部クラッド層およびコア層となる活性層を矩形に加工した構造で、コア層に光を強く閉じ込めることができる。

### ※8 SOA

Semiconductor Optical Amplifier: 半導体光増幅素子。

## 参 考 文 献

- (1) H. Yagi, T. Kaneko, N. Kono, Y. Yoneda, K. Uesaka, M. Ekawa, M. Takechi, and H. Shoji, "InP-Based Monolithically Integrated Photonic Devices for Digital Coherent Transmission," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 24, no. 1, 6100411 (Jan./Feb. 2018)
- (2) C. Doerr, L. Chen, D. Vermeulen, T. Nielsen, S. Azemati, S. Stulz, G. McBrien, X.-M. Xu, B. Mikkelsen, M. Givehchi, C. Rasmussen, and S.-Y. Park, "Single-Chip Silicon Photonics 100-Gb/s Coherent Transceiver," Proc. OFC/NFOEC 2014, paper Th5C.1 (2014)
- (3) M. Takenaka, J. Han, F. Boeuf, J. Park, Q. Li, C. P. Ho, D. Lyu, S. Ohno, J. Fujikata, S. Takahashi, and S. Takagi, "III-V/Si Hybrid MOS Optical Phase Modulator for Si Photonic Integrated Circuits," Proc. ECOC 2018, paper Mo3C.3 (2018)
- (4) M. Tran, D. Huang, J. Guo, T. Komljenovic, P. A. Morton, and J. E. Bowers, "Ring-Resonator Based Widely-Tunable Narrow-Linewidth Si/InP Integrated Lasers," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 26, no. 2, pp. 1500514 (Mar./Apr. 2020)
- (5) Y. Gao, J. Lo, S. Lee, R. Patel, L. Zhu, J. Nee, D. Tsou, R. Carney, and J. Sun, "High-Power, Narrow-Linewidth, Miniaturized Silicon Photonic Tunable Laser With Accurate Frequency Control," J. Lightwave Technol., vol. 38, no. 2, pp. 265-271 (2020)
- (6) J. Zhang, G. Muliuk, J. Juvert, S. Kumari, J. Goyvaerts, B. Haq, C. Beeck, B. Kuyken, G. Morthier, D. V. Thourhout, R. Baets, G. Lepage, P. Verheyen, J. V. Campenhout, A. Gocalinska, J. O' Callaghan, E. Pelucchi, K. Thomas, B. Corbett, A. J. Trindade, and G. Roelkens, "III-V-on-Si photonic integrated circuits realized using micro-transfer-printing," APL Photon., vol. 4, 110803 (2019)
- (7) R. Kou, T. Hiratani, H. Yagi, H. Kuwatsuka, M. Okano, M. Ohno, H. Kawashima, K. Suzuki, N. Fujiwara, H. Shoji, and K. Yamada, "III-V/Si Adiabatic-Crossing Taper Structure Designed for  $\mu$ -Transfer Printing," Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics, paper SM2O.7 (2020)
- (8) R. Kou, T. Hiratani, H. Yagi, H. Kuwatsuka, T. Yen, M. Okano, M. Ohno, H. Kawashima, K. Suzuki, N. Fujiwara, H. Shoji, and K. Yamada, "Inter-layer light transition in hybrid III-V/Si waveguides integrated by  $\mu$ -transfer printing," Opt. Express, vol. 28, no. 13, pp. 19772-19782 (2020)
- (9) Y. Wang, K. Nagasaka, T. Mirtarai, Y. Ohiso, T. Amemiya, and N. Nishiyama, "High-quality InP/SOI heterogeneous material integration by room temperature surface-activated bonding for hybrid photonic devices," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 59, 052004-1-10 (2020)
- (10) T. Kikuchi, L. Bai, T. Mitarai, H. Yagi, M. Furukawa, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Enhanced bonding strength of InP/Si chip-on-wafer by plasma-activated bonding using stress-controlled interlayer," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 59, SBBD02-1-8 (2020)
- (11) T. Hiratani, N. Fujiwara, T. Kikuchi, N. Inoue, T. Ishikawa, T. Nitta, M. Eissa, Y. Oiso, N. Nishiyama, and H. Yagi, "III-V gain region/Si external cavity hybrid tunable lasers with InP-based two-storied ridge structure," ISLC 2021, paper TuA3-6 (2021)
- (12) T. Kikuchi, T. Hiratani, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Nitta, M. Eissa, T. Mitarai, Y. Wang, Y. Oiso, N. Nishiyama, and H. Yagi, "III-V gain region/Si waveguide hybrid lasers with InP-based two-storied ridge structure by direct bonding technology," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 61, 052002-1-10 (2022)
- (13) J. Suzuki, F. Tachibana, K. Nagasaka, M. Eissa, L. Bai, T. Mitarai, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Highly efficient double-taper-type coupler between III-V/silicon-on-insulator hybrid device and silicon waveguide," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 57, 094101-1-6 (2018)
- (14) T. Miyazaki, F. Tachibana, T. Kikuchi, T. Hiratani, H. Yagi, M. Eissa, T. Mitarai, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, "Taper Length Dependence of Double Taper-Type Coupler for GainAsP/SOI Hybrid Integrated Platform," Proc. Compound Semiconductor Week (CSW) 2019, paper TuA3-6 (2019)

## 執 筆 者

平谷 拓生\* : 伝送デバイス研究所  
博士 (工学)



井上 尚子 : 伝送デバイス研究所 主査



菊地 健彦 : 伝送デバイス研究所 主査



新田 俊之 : 伝送デバイス研究所 グループ長



藤原 直樹 : 伝送デバイス研究所 グループ長  
博士 (工学)



八木 英樹 : 伝送デバイス研究所 主幹  
博士 (工学)



\* 主執筆者