

小片／ウェハ接合技術を用いた InP/Si 異種材料集積プラットフォーム

InP/Si Heterogeneous Integration Platform Using Chip-on-Wafer Bonding Technology

八木 英樹*
Hideki Yagi

平谷 拓生
Takuo Hiratani

田中 肇
Hajime Tanaka

沖本 拓也
Takuya Okimoto

御手洗 拓矢
Takuya Mitarai

菊地 健彦
Takehiko Kikuchi

IoT技術を用いた様々なアプリケーションやAI技術の進展に伴い、通信量が飛躍的に増大しており、2030年には一つのトランシーバに要求されるデータレートが10 Tb/s級に達すると予想されている。一方、光通信システムを支えてきた単一材料光デバイスにおいては、Multi-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フォトリソグラフィ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、この特性限界を克服する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として導入した小片／ウェハ接合技術を紹介すると共に、異種材料集積の特長を活かした波長可変レーザ、マッハツェンダ変調器、受光器について報告する。

With the development of various IoT applications and AI technologies, data traffic has been rapidly increasing. The data rate required for a single transceiver is expected to reach the 10 Tb/s class in 2030. On the other hand, single-material photonic devices that support optical communication systems are beginning to show limitations in simultaneously achieving wide bandwidth and low power consumption for multi-Tb/s-class data transmission, necessitating a technological breakthrough. Heterogeneously integrated photonic devices combine the advantages of two key technologies. First, III-V compound semiconductors, which provide high-speed and high-efficiency operation. Second, silicon photonics, which enables high-density integration through device miniaturization. By leveraging both advantages, these devices make a promising approach to overcome the inherent limitations. In this paper, we introduce heterogeneous integration technology using a chip-on-wafer bonding process. We also report on wavelength-tunable lasers, Mach-Zehnder modulators, and photodetectors utilizing the benefits of heterogeneous integration.

キーワード：異種材料集積、InP、シリコンフォトリソグラフィ、小片／ウェハ接合

1. 緒 言

第5世代移動通信システム (5G)、さらには、6Gといったモバイルシステムの発展に伴い、様々な「モノ」がインターネットに接続されるIoTアプリケーションが進展してきた。これに加えて、ChatGPTに代表されるArtificial Intelligence (AI) 技術が急速に普及しており、我々の生活における利便性が大きく向上している。これに伴い、AIデータセンタネットワークは、サーバ内・サーバ間のスケールアップ・スケールアウトの進展に加えて、複数のデータセンタのGPUクラスター化により処理能力を向上させる分散型AIデータセンタ (スケールアクロス) が提唱されており、さらなる本技術の発展が期待されている。このような状況から、通信ネットワークを支える光ファイバ通信に関しては、アクセスネットワークやデータセンタネットワークといった短距離伝送に加えて、中・長距離伝送においても、高速・大容量伝送が求められている。また、データ伝送を行う光トランシーバの需要が急速に拡大すると共に、それに搭載される光デバイス的高速動作と低消費電力との両立が強く求められている。このデータ伝送容量の拡大に

伴い、光トランシーバに要求される伝送速度は、2030年には10 Tb/s級に達すると予想されている。

これまで、光通信システムでは、Ⅲ-V族化合物半導体^{*1}であるリン化インジウム (InP) を用いた集積光デバイス⁽¹⁾やシリコン (Si) フォトリソグラフィ^{*2 (2)}が利用されてきたが、10 Tb/s級のデータ伝送に向けては、単一材料の光デバイスの利用だけでは実現が困難であり、これらの多チャネル化により伝送容量を増大させることが有望なアプローチの一つと考えられてきた。一方、この手法はデバイスの大型化、コストの増加、並列処理による消費電力の増大等が懸念される。例えば、800 Gb/sの伝送速度に対応するデジタルコヒーレント伝送^{*3}向け小型・低消費電力光トランシーバを使用した場合でも、10 Tb/s級伝送に対しては、12チャネル以上が必要となり、トータル消費電力は200 Wを超えると試算され、抜本的なデバイスの低消費電力化が必要である。このように、従来の光通信システム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 フォトニクスそれぞれの利点を適材適所に用いる異種材料集積光デバイス技術は、単一材料光デバイスの特性限界を克服する有望なアプローチとして期待されている。単一材料光デバイスで主に用いられている 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、これを低コスト・高密度集積に優れた Si フォトニクスプラットフォーム上に配置することで、高速動作を可能としかつ、小型な光集積回路を実現できる。さらに、それぞれの利点を生かした設計を行うことで、単一材料光デバイスを超える高効率・低消費電力な動作が期待される^{(3),(4)}。本稿では、異種材料集積技術として、InP 小片を SOI (Si on insulator) ウェハ上に直接接合するプロセスを紹介すると共に、これを用いて作製した波長可変レーザ、マッハツェンダ (MZ) 変調器、受光器について報告する。

2. InP 小片／SOI ウェハ接合

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、実装によりそれぞれの端面を突き合わせる集積手法⁽⁵⁾や、Ⅲ-V 族化合物半導体ウェハ上に作製したデバイスをピックアップし、Si フォトニクスウェハ上の所望の位置に接合できるマイクロトランスファープリンティング⁽⁶⁾、Ⅲ-V 族化合物半導体のウェハまたは小片を Si フォトニクスウェハ上に接合し、後からⅢ-V 族化合物半導体領域の加工を行うことで、集積デバイスを作製する直接接合法^{(7),(8)}が主に用いられてきた。その中で、我々は異なる種類のⅢ-V 族化合物半導体小片を接合することで、様々な機能を有するデバイスを 1 チップ内に高密度に集積することが可能としかつ、接合後のフォトリソグラフィによるパターニングで位置合わせ精度が決定されるため、上述した他の手法と比較して、高い位置精度が得られる InP 小片／SOI ウェハ接合を用いて、異種材料集積光デバイスの検討を行ってきた。本手法は高い位置精度により、InP/Si 間の導波路位置ずれに起因した光結合損失を極力低減することができるため、InP/Si 導波路間で高い光結合効率が得られるのが特長であり⁽⁹⁾、InP 系アクティブ領域を Si 光回路上に多機能集積する上で、有利と考えられる。

図 1 に InP 小片／SOI ウェハ接合のプロセスフローを示す⁽⁸⁾。最初に、所望のエピタキシャル構造を結晶成長した InP ウェハを準備し、それを分割することで、InP 小片を作製する。分割後、表面の異物を除去するためのクリーニングとして、超音波洗浄を行う。続いて、InP 小片の表面に UV オゾン照射を行うことで、小片表面の親水化処理を行う。接触角測定から、UV オゾン照射後の表面は十分な親水性になっていることを確認している。表面処理完了後の InP 小片は Pick-and-place 法で、SOI ウェハ上の任意の位置に接合される。ここまでのプロセスは大気環境下で実施されている。その後、真空チャンバ内で、荷重を印加した

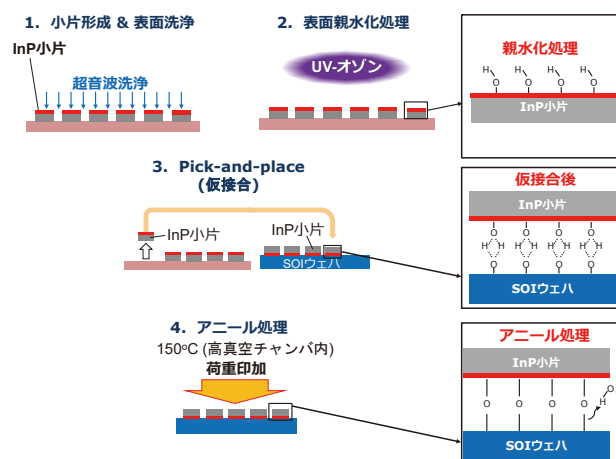


図1 InP 小片／SOI ウェハ接合プロセスフロー

がら、温度150℃のアニール処理を行う。これにより、接合界面での脱水縮合反応が進み、酸化層を介した強固な接合状態が得られる。図2に InP 小片接合後の SOI ウェハの光学顕微鏡写真を示す。Si 光回路上に高密度に InP 小片が接合されている。

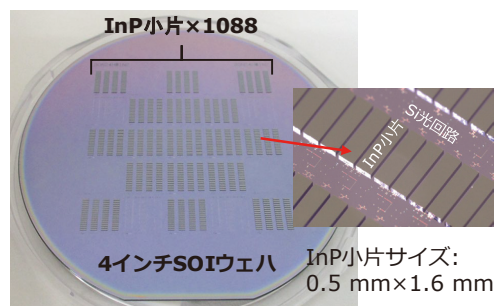


図2 InP 小片接合後の SOI ウェハの光学顕微鏡写真

以上の小片接合プロセスを用いて、InP 系アクティブデバイスの多機能集積の実現可能性を検証した⁽¹⁰⁾。コヒーレントトランシーバの機能を模擬した Si 光回路を作製し、そのウェハ上の 8.8 mm × 6.0 mm の領域内に構造の異なるエピタキシャル層を有する 0.5 mm × 1.6 mm の InP 小片 21 個を接合し、評価を行った。本検討では、レーザ／半導体光増幅器 (SOA)、変調器および受光器用の 3 種類の InP 小片を用いた。図3に接合後の光学顕微鏡写真を示す⁽¹⁰⁾。それぞれの InP 小片が所望の位置に接合されていることを確認した。さらに、接合後、ウェットエッチングにより InP 基板を除去し、エピタキシャル層のみを Si 光回路上に残し、表面観察を行った結果、厚さの異なる 3 種類のエピタキシャ

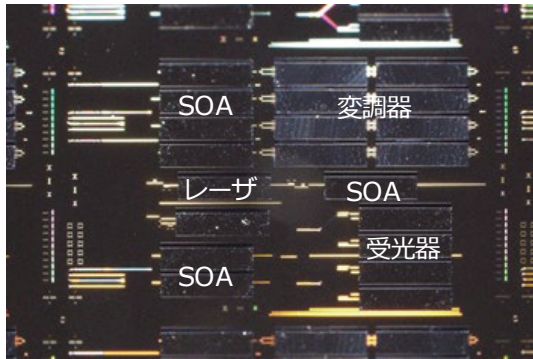


図3 コヒーレントトランシーバの機能を模擬したSi光回路上に複数種のInP小片を接合した後の光学顕微鏡写真

ル層が、剥離なく、Si光回路上に接合されていることを確認した。これらのフォトルミネッセンススペクトル測定を行った結果、波長1200 nm、1530 nm、1610 nmにピークを有しており、変調器のGaInAsP コア層、レーザおよびSOAのGaInAsP 活性層、受光器のGaInAs 吸収層からの発光に対応している。以上の結果から、小片接合は、厚さやエピタキシャル層の組成が異なるInP小片をSi光回路上の任意の位置に接合可能であり、Ⅲ-V族化合物半導体アクティブデバイスのSiフォトンクスプラットフォーム上の多機能および高密度集積の実現に向けて有望であることを示した。

3. InP/Si異種材料集積光デバイス

3-1 波長可変レーザ

InP/Si異種材料集積により波長可変レーザを作製した場合、利得領域をInP系量子井戸活性層とし、波長可変機構を小型かつ、Q値の高いSiフォトンクスから成る波長フィルタとすることで、従来の単一材料素子では実現が困難であった広い波長可変域で、狭スペクトル線幅特性が得られる⁽¹¹⁾。図4に作製した波長可変レーザの構造を示す⁽¹²⁾。共振器は、InP系利得領域とSi導波路を用いたリング共振器^{*4}およびループミラー^{*5}を組み合わせた構成となっている。波長可変動作には、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得られるバーニア効果^{*6}を利用しており、それぞれのリング共振器上に形成されたマイクロヒータによる熱光学効果を用いて屈折率を制御することで、広い波長可変域での動作が可能となる。さらに、小片接合技術の複数の設計の異なるInP小片を高密度に集積することができる特長を活かし、異なる波長帯向けのInP小片を接合することで、波長可変レーザの動作波長帯域を拡大することができる。小片接合により、C帯(1530 nm - 1565 nm) およびL帯(1565 nm - 1625 nm) 向けに異なる利得領域を有する波長可変レーザを1チップSi光回路上に集積した。また、2×2 多モード干渉

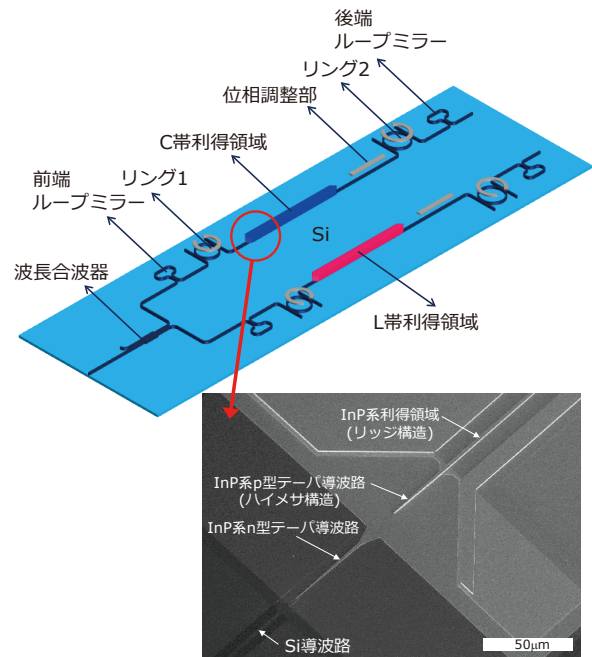


図4 1チップSi光回路C帯およびL帯対応異種材料集積波長可変レーザの構造図とInP/Si光結合部のSEM写真

(MMI) カップラから成る波長合波器を用いて、1つの出力ポートに各出力を結合させるレイアウトを用いた。InP系利得領域とSi導波路との光結合部は図4中の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真に示すように、p型テーパーとn型テーパーから成る二段テーパー導波路構造を導入している⁽⁹⁾。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の二種類を用いた二段リッジ構造としている。本構造を用いることにより、光結合損失およびその波長依存性の低減が可能であり、波長可変レーザ応用に適している。

小片接合を用いた波長可変レーザの作製プロセスは次の通りである。最初に、電子ビーム露光法により、SOIウェハ上にリング共振器等の波長可変動作に必要なSi導波路を形成する。次に、GaInAsP 多層量子井戸を有するInP小片を上述した手法によりSi導波路上に接合する。その後、InP基板およびエッチストップ層をウェットエッチング等で除去すると、Si導波路上にGaInAsP 活性層を含むレーザ構造のみが残留した状態となる。次に、フォトリソグラフィーおよびドライエッチング等により、利得領域のリッジメサや二段のテーパー導波路構造を形成する。これらの加工後、SiO₂クラッド層を成膜し、電極形成、マイクロヒータ形成を行う。

本素子の特性評価を行った結果、図5に示すようにC帯およびL帯をカバーし、104.4 nmの広波長可変域動作が得られ、チャンネル間隔100 GHzにおける疑似連続波長可変動作を実現した⁽¹²⁾。また、波長可変範囲全域で概ね一定の光出力特性およびSMSR > 45 dBの単一モード動作を確認した。これらの結果から、異なる設計の活性層を有する二種

類のInP小片を接合することで、均一な特性を維持したまま動作波長帯域の拡大が可能であることを示した。また、周波数雑音の評価からスペクトル線幅を見積もった結果、波長可変域全体で50 kHz以下の狭線幅が得られた⁽¹²⁾。以上から、Multi-Tb/s動作・長距離伝送向け次世代デジタルコヒーレント伝送システム用光源として期待されている特性を実現した。

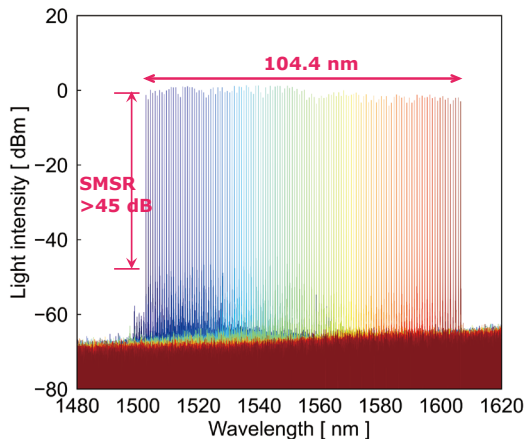


図5 1チップSi光回路上C帯およびL帯対応異種材料集積波長可変レーザの擬似連続波長掃引動作時の発振スペクトルの重ね合わせ

3-2 MZ変調器

InP/Si異種材料集積を用いたMZ変調器は、二つのアームの差動駆動による屈折率（位相）変調を効率良く行うため、量子閉じ込めシュタルク効果（QCSE）^{*7}を用いた非線形効果を利用し、高変調効率動作に優れ、高速動作が可能なInP系多層量子井戸（MQW）を有するInP小片を接合している。また、光導波路の取り回しや、1×2 MMI分岐構造等に小型、低光損失を特長とするSiフォトリソプラットフォームを利用することで、コヒーレント伝送向けにアレイ化を行ったとしても、小フットプリントのMZ変調器アレイを作製可能である。図6に異種材料集積pin型MZ変調器の構造を示す⁽¹³⁾。InP/Si光結合部は、二段テーパ導波路構造を用いている⁽⁹⁾。高周波設計に関しては、容量装荷型進行波電極構造が採用されている。本構造は光と電気との速度整合を行うため、電極が周期的に配置されており、容量低減に有利である。また、インピーダンス整合を行い、周波数応答の反射を低減するため、終端抵抗を集積している。

図7(a)にInP系変調器領域の差動変調特性を示す。QCSEを効率良く利用するため、変調器領域に8 Vの逆バイアスを印加した上で、Upper armとLower armに対し、差動方式で印加電圧を変化させた。半波長電圧 V_{π} と変調器領域の容量装荷型進行波電極の面内占有率（FF）を考慮した実

効的な電極長（L）1.2 mm（トータル電極長：2.0 mm）から、 $V_{\pi}L = 0.43$ Vcmの高効率変調特性が得られた⁽¹³⁾。

図7 (b) は高周波差動信号に対する光の周波数応答特性を示す（トータル電極長：1.0 mm、FF：60%、逆バイアス電圧：8 V、 V_{π} ：7.2 V）。1.5 GHzで規格化し、電気／光（EO）3 dB帯域は73 GHzと広帯域動作が得られた⁽¹³⁾。

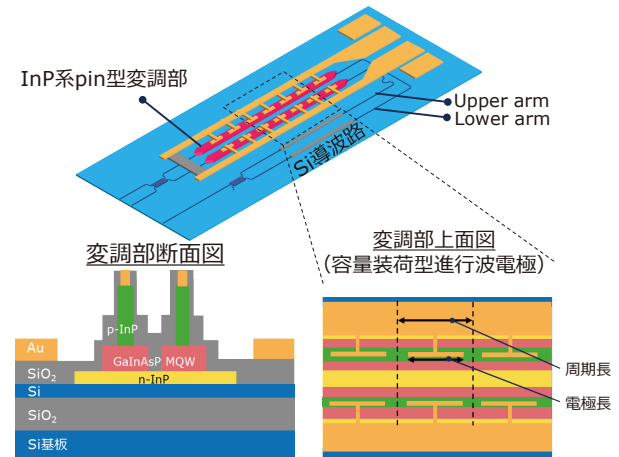


図6 異種材料集積pin型MZ変調器の構造図

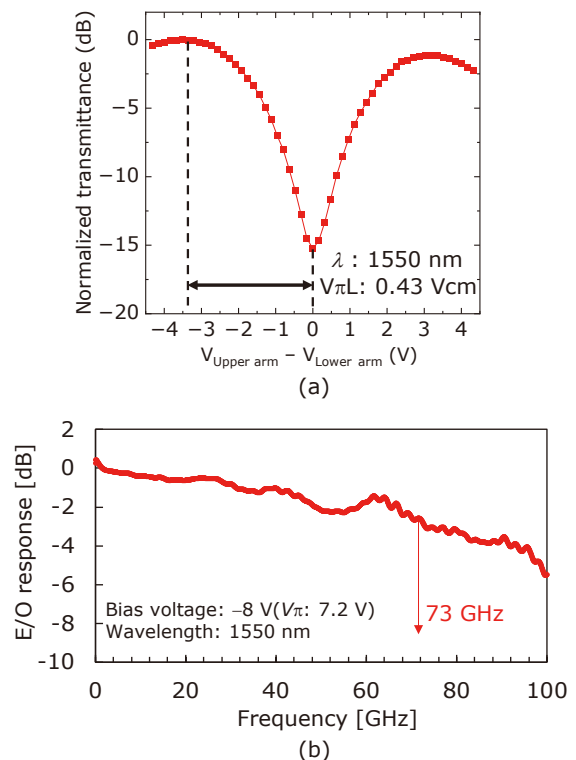


図7 異種材料集積pin型MZ変調器の
(a) InP系変調器領域（トータルの電極長：2 mm、FF：60%）の差動駆動による消光特性、
(b) EO差動信号周波数応答特性（トータルの電極長：1 mm、FF：60%、逆バイアス電圧：8 V）

3-3 受光器

図8に作製したコヒーレント伝送向けInP/Si受光器の構造図を示す⁽¹⁴⁾。Si導波路 (SiPH) を用いた90°ハイブリッド^{※8}は、4×4 MMIで構成されており、電子ビーム露光法により形成した。90°ハイブリッドと接続され、In-phase (I-CH) およびQuadrature (Q-CH) に対応する4チャンネルpin型フォトダイオード (PD) アレイ部分はSi導波路上にGaInAs吸収層を含むメサが形成されており、GaInAs/InP小片の接合により集積した。また、InP/Si光結合部は、他の異種材料集積光デバイスと同様に、二段テーパ導波路構造を用いている⁽⁹⁾。本デバイスのサイズは1.0 mm×1.2 mmであり、Siフォトリソを用いることで、従来のInP系の受光器⁽¹⁾と比較して、20%のサイズに小型化されている。

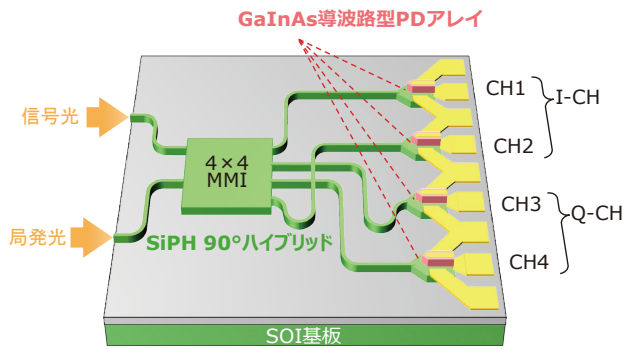


図8 Si導波路を用いた90°ハイブリッドを集積したInP系pin-PDアレイ

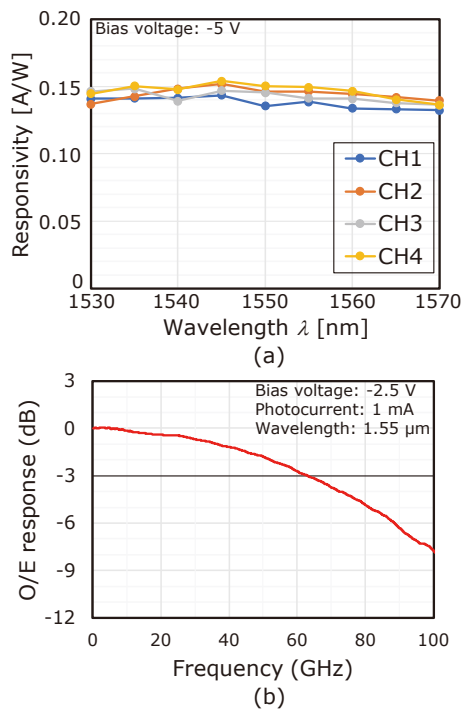


図9 Si導波路を用いた90°ハイブリッドを集積したInP系pin-PDアレイの
(a) 受光感度の波長依存性、(b) OE周波数応答

異種材料集積受光器の受光感度の波長依存性を図9 (a) に示す⁽¹⁴⁾。光ファイバとの光結合損失、90°ハイブリッドの原理損失 (6 dB) を含む受光感度はInP系PDの特長を活かすことで、0.13 A/W以上の高い値がC帯全域で得られており、チャンネル間感度偏差はC帯全域で、 ± 0.5 dB以下となった。また、図9 (b) に異種材料集積受光器の光/電気 (OE) 周波数応答を示す⁽¹⁴⁾。1 mAの光入力条件において、3 dB帯域が64 GHzの広帯域動作を示した。

4. 結 言

本稿では、InP小片/SOIウェハ接合を用いた異種材料集積により波長可変レーザを作製し、設計の異なる二つの利得領域を集積したことによる100 nmを超える広波長可変域動作と、Si導波路から成るリング共振器の高いQ値を利用した狭スペクトル線幅特性 (<50 kHz) を示した。また、これをMZ変調器および受光器にも応用し、InP系アクティブ領域とSiフォトリソの特長を活かすことで、小型かつ、高効率および100 GBaudに対応する広帯域動作を実証した。

本稿では、1.5 μ m帯デジタルコヒーレント伝送向け光デバイスにInP/Si異種材料集積を適用し、その優位性を実証した。本技術は、Siフォトリソ上に1.3 μ m帯を含む様々な波長帯のデバイスを集積可能であることから、光デバイスの次世代プラットフォーム技術として、今後、広く展開していく。

5. 謝 辞

本研究は、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) (JPNP16007) および ARIM (JPMXP1224IT0013 and 1225IT0013) の支援を受けて行われた。

用語集

※1 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長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。

※2 Siフォトリソ

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光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。

※3 デジタルコヒーレント伝送

光の電磁波としての性質を利用し、信号光の強度と位相の両方にデータを重畳する光通信方式。光信号が送信器、受信器、伝送媒体（光ファイバなど）で受ける信号品質劣化をデジタル信号処理回路で補償し、誤りのないデータを復号できることを特長とする。

※4 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。

※5 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を用いて戻すことで、反射器として機能する。

※6 パーニア効果

ノギスが由来で、異なるピーク間隔を有する二つの共振スペクトルが一致した波長で、干渉により強め合う効果。

※7 量子閉じ込めシュタルク効果

量子井戸構造に垂直方向の電界を印加した際、閉じ込められた電子と正孔の波動関数が空間的に分離し、励起子吸収ピークが低エネルギー側（長波長側）へシフトする現象。

※8 90°ハイブリッド

混在して伝搬してきた位相信号を局発光との光の干渉を利用して、復調する光導波路。

・ ChatGPTは、OpenAI, Inc.またはその子会社の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

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. Givahchi, C. Rasmussen, and S.-Y. Park, "Single-Chip Silicon Photonics 100-Gb/s Coherent Transceiver," in 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," in Proc. 44th European Conference on Optical Communication (ECOC), 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, Art. no. 1500514 (Mar./Apr. 2020)
- (5) N. Kobayashi, K. Sato, M. Namiwaka, K. Yamamoto, S. Watanabe, T. Kita, H. Yamada, H. Yamazaki, "Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers," J. Lightwave Technol., vol. 33, no. 6, pp. 1241-1246 (2015)
- (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, no. 11, Art. no. 110803 (2019)
- (7) Y. Wang, K. Nagasaka, T. Mitarai, 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)
- (8) T. Kikuchi, M. Kurokawa, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Hiratani, T. Nitta, T. Mitarai, Y. Itoh, C. Lee, A. Furuya, Y. Oiso, N. Nishiyama, and H. Yagi, "III-V gain region/Si waveguide hybrid lasers by chip-on-wafer hydrophilic bonding process using UV-ozone treatment," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 62, no. 12, Art. no. 122002 (2023)
- (9) 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)
- (10) T. Kikuchi, M. Kurokawa, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Mitarai, H. Fujikata, T. Hiratani, T. Nitta, Y. Itoh, T. Watanabe, C.-Y. Lee, A. Furuya, T. Horikawa, N. Nishiyama, and H. Yagi, "Monolithic integration of various-type III-V epitaxial structures on silicon photonics platform using chip-on-wafer hydrophilic bonding process," in Proc. the IEEE 2024 Silicon Photon. Conf., Paper MB3, doi: 10.1109/SiPhotonics60897.2024.10543539 (2024)
- (11) T. Hiratani, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Kikuchi, T. Okimoto, T. Mitarai, M. Kurokawa, H. Tanaka, H. Fujikata, T. Watanabe, T. Nitta, N. Nishiyama, and H. Yagi, "InP/Si Heterogeneously Integrated Tunable Laser by Utilizing Chip-on-Wafer Bonding Method," J. Lightwave Technol., vol. 43, no. 4, pp. 1708-1715 (2025)
- (12) T. Hiratani, K. Komatsu, H. Fujikata, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Kikuchi, T. Mitarai, S. Kimura, T. Okimoto, Y. Sawada, E. Banno, T. Matsui, T. Fujisawa, N. Nishiyama, and H. Yagi, "Scalable multi-band narrow linewidth operation by a single-chip tunable laser with InP/Si heterogeneous integration," in Proc. 51th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), W.03.02.2 (2025)
- (13) H. Tanaka, N. Kasuya, T. Misawa, K. Komatsu, N. Inoue, T. Kikuchi, T. Mitarai, S. Kimura, N. Fujiwara, N. Nishiyama,

H. Yagi, "Heterogeneously Integrated C-band p-i-n Type Mach-Zehnder Modulators Utilizing InP Chips on SOI Wafer Bonding Technology," IEICE Trans. Electron., PAPER Special Section on Opto-electronics and Communications for Future Optical Network, to be published

(14) T. Mitarai, T. Okimoto, S. Kimura, T. Kikuchi, N. Inoue, N. Fujiwara, N. Nishiyama, and H. Yagi, "High-efficient and Compact InP/Si Heterogeneously Integrated Coherent-Receiver PICs using Chip-on-Wafer Bonding," in Proc. 31st OptoElectronics and Communications Conference, to be presented

執 筆 者

八木 英樹* : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所 主幹
博士 (工学)



平谷 拓生 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



田中 肇 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



沖本 拓也 : 伝送デバイス研究所 主査



御手洗拓矢 : 伝送デバイス研究所



菊地 健彦 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



*主執筆者