

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 02101
研究開発課題名 超低消費電力・大容量データ伝送を実現する革新的
 EO ポリマー/Si ハイブリッド変調技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、超高速・大容量伝送のコアとなる光変調技術について、高性能 EO ポリマーを用いた Si ハイブリッド集積型光変調器 (SPH: Si polymer hybrid modulator) を開発し、将来、超高速光データ伝送のトランスミッタ技術に展開することを目的とする。B5G が普及する 2030 年には、光ファイバ網および移動通信の大容量化が加速するため、情報通信のシームレス化・高速化とともに、カーボンニュートラルに向けた低消費電力化が重要になると予想される。光通信トラフィックをけん引する光コンポーネントとして、SPH は小型・高効率変調器として期待ができ、光・電気融合集積化へも対応できる。SPH 応用の最終目標は、B5G の「超高速・大容量化を実現する技術」および「超低消費電力を実現する技術」に貢献し、実用的な光インターフェースへの実装が可能な集積小型 SPH 技術を構築することである。

令和 5 年度、「1-a) 高効率 SPH の研究開発」では、前年度に開発した SPH 変調器を用いて 100Gbaud 信号生成を確認したことから、信号精度の改良実験を進め高速光変調の高効率化を目指す。特に将来的に 10Tb/s 級トランシーバ技術へ展開し得る技術とするため、HD-FEC や KP-4 FEC などで規定される誤り訂正閾値以下の信号精度を目指す。「1-b) InP 応用 SPH の研究開発」では、昨年度開発した 100Gbaud 以上の高速変調用電極構造を用いた変調特性の解析を行うと共に、低光損失化に向けた作製プロセスおよび構造パラメータの最適化を行う。「1-c) 100Gbaud 変調解析の研究開発」では、100Gbaud 伝送の効率的な信号処理アルゴリズムを開発し、SPH に適用する。これらの課題は、徳島大学と九州大学(2023 年 9 月までは会津大学を含む)が連携して取り組み、研究開発を行う。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人徳島大学 <代表研究者>
国立大学法人九州大学
公立大学法人会津大学 (2023 年 9 月まで)

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 367 百万円 (令和 5 年度 77 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 集積小型 SPH 技術の研究開発
1-a 高効率 SPH の研究開発 (九州大学)
1-b InP 応用 SPH の研究開発 (徳島大学、九州大学)
1-c 100Gbaud 変調解析の研究開発 (会津大学 (2023 年 9 月まで)、九州大学)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	4	1
	外国出願	1	1
外部発表等	研究論文	14	3
	その他研究発表	52	18
	標準化提案・採択	12	7
	プレスリリース・報道	2	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 集積小型 SPH 技術の研究開発

「1-a) 高効率 SPH の研究開発」では、ナノリソグラフィー技術を活用して構造最適化した SPH を作製し、100Gbaud 以上の超高速変調の動作試験と高周波応答やデータ伝送の評価・解析を進めた。高速変調実験では、変調信号の高速性を高め高精度な変調実験を進めることで 150Gbaud 伝送を実証した。また、O 帯の高速変調についても評価を行い、100Gbaud 以上の信号伝送の試験を行った。「1-b) InP 応用 SPH の研究開発」では、薄膜化した InP 基板を用いて、InP-SPH を作製した。課題 1-a の知見を活かして変調器の作製に取り組み、電気帯域が 100Gbaud 以上の光変調を実現するのに十分な 70GHz 以上の高い周波数応答性を確認した。「1-c) 100Gbaud 変調解析の研究開発」では、デジタルプロセス処理を活用して、従来の DSP に比べて等価能力がさらに向上できるシフト畳み込みニューラルネットワークを適応することで、100Gbaud PAM4 の信号高精度化を確認した。本研究開発項目で得られた研究成果は、下記の通りである。

1-a 高効率 SPH の研究開発：これまでにデバイス最適化を進めてきた SPH を使って、158Gbaud の変調実験を行った。特に本年度は、O 帯でも動作が可能な SPH の検討を行い、C 帯での変調特性と比べても同程度の信号精度で、豪速変調動作することを確認した。高速伝送試験では、100Gbaud 以上の信号伝送実験の解析から Q 値が 12.1dB 以上と高く、SPH の優れた変調統制を確認することができた。最高 158Gbaud までの変調を確認することができ、変調器以外の周辺部材の帯域制限を解決することで、さらに高速の SPH を作製できることを確認した。SPH の高速動作電圧は、1.2Vpp(140Gbaud)であった。100Gbaud の変調動作であれば、0.6Vpp 以下の動作電圧でも信号エラー閾値未満の高精度なデバイス動作が可能であることを確認した。BER 解析から、得られた信号精度が 10^{-8} 未満であることを確認した。また、多値変調方式を使った信号伝送実験では、最高で 240Gbit/s の信号レートに到達した。

1-b InP 応用 SPH の研究開発：SPH の設計では、シリコン光導波路内の高い光電場強度と EO ポリマーの電気光学特性を組み合わせ、小フットプリント、低電圧動作、および高速変調の機能を付与することができる。本課題では、Si より高い電気移動度を持つ化合物半導体の応用に着眼して、光変調の高効率化につながる SPH の検討を行った。本年度は、昨年度に引き続き SPH の低光損失化に向けた作製プロセスの最適化を行い、リブ型光導波路のナノ構造作製プロセスを開発すると共に、リブ型光導波路構造においても超高速光変調が可能なオーミックコンタクトプロセスを開発した。これにより、世界初の InP 薄膜基板を用いたナノ導波路構造および低損失導波路の作製プロセスを適用した InP 応用 SPH を開発した。また、電気帯域が 100Gbaud 以上の光変調を実現するのに十分な 70GHz 以上の高い周波数応答性が可能なことを確認した。また、光変調素子と光ファイバとの低損失結合を実現するため、耐熱レジスト材料を用いたスポットサイズ変換器の開発も併せて行った。

1-c 100Gbaud 変調解析の研究開発：本課題では、プリエンファシス(Pre-emphasis)による周波数イコライゼーション用のフィルタプログラムやイコライゼーションアルゴリズムの開発も行ってきた。作成したプログラムの有効性は、SPH を使って発生した PAM4 信号を検出し、プログラムによる補正結果を確認することで実証できた。本年度は、さらに高度な信号等価を目指して、非線形 Volterra フィルタリングを使った DSP についても検討を行った。本手法では、従来の DSP に比べて等価能力がさらに向上できる特徴を持ち、AI による等価アプローチとして知られるシフト畳み込みニューラルネットワーク(Pre-shift-CNN)を適応した。その結果、100Gbaud PAM4 信号に適応した信号処理によって、最大 10^{-5} の BER を持つ PAM4 信号を救済することに成功し、アイパターンからの信号精度の高さが確認できた。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

8-1 計画

外部発表など研究成果の情報発信の計画：大学研究機関が行う最先端成果の情報発信は、国内外学会や専門学術誌での発表が主たる方法となる。特に情報通信分野で国際的に産業界からも注目が高く速報性のある Optical Fiber Communications Conference (OFC) や European Conference on Optical Communication (ECOC) などでの報告は、情報発信・成果普及の方法としては有効である。

一方、社会実装者(企業)からの情報発信は、OFC や ECOC で併催の展示会での発表やデモセッションでの発信が有効である。

製品化等、成果の産業応用についての見通し：SPH の製品化に向けた展開は、標準化に沿った形で段階的に開発を進める必要がある。最終的な SPH を実装した製品は、シリコンフォトニクス光集積回路を搭載した集積光トランシーバである。2024 年頃にまず、5G 市場で EO ポリマー技術の波及効果を得るため、1Tb/s 級動作をさせるため電気回路を含めた総合的な高周波設計、SPH を適切に動作させるための制御回路の搭載などを実施する。詳細設計、試作、特性評価を行うとともに、変調器部分以外も含めた送受信器としての信頼性評価や、量産性、製造性改善などを実施する。実用化に向けた実装の目安としては 400G 向けに業界標準化団体である OIF (Optical Internet-working Forum) で議論されている IC-TROSA (Integrated Coherent Transmit-Receive Optical Sub Assembly) サイズの 30x15x6.5mm を考え、1Tb/s 動作可能な QSFP 級の小型光トランシーバへの搭載技術を開発する。製品実用化を進める社会実装者は、SPH を実装した小型光トランシーバのため電源回路やデジタル信号処理回路の高密度実装技術開発、光集積回路とデジタル信号処理回路間の高周波実装技術および信号処理回路のイコライザを用いた特性補償技術開発、またトランシーバ全体の制御回路や制御ファームウェアの開発を行う。試作による実機確認を行うとともに、顧客へのサンプル提供や評価フィードバックをもとに最終仕様を確定する。

以上のように、本研究開発の産業応用の計画は具体的であり、直近の 1Tb/s 応用で実績を積むことで、2024 年以降には標準化の議論が進むと予測される 10Tb/s 光トランシーバの開発に向けて優位な技術力を積み上げることができる。

知財戦略としては、目指す製品での優位性を確保するためには、一つは適用する EO ポリマー材料自体に優位性があること、即ち、信頼性に優れ、高効率な変調動作が可能であることが必要であり、本研究開発の基盤である知財となっている。加えて必要な知財戦略を実用的観点からみると、そのポリマー材料を使って光集積回路を量産可能とする技術である。量産化には、試作と異なり品質の安定化、製造時間の短縮、試験方法の確立、変調器以外の部分を含めた光集積回路全体としての作りやすい構造や最適製造フローの確立が必要である。本研究開発の知的財産活動では、今後、量産化技術であるため知的財産化すべき部分とノウハウとして秘匿すべき部分の両面から検討する方針である。

8-2 展望

B5G における光通信デバイスの市場規模としては、光通信機器を合わせて 62 兆円規模となることが予想されている([プレスリリース：『2023 光通信関連市場総調査』まとまる \(2023/11/9 発表 第 23118 号\)](#))。特にデータセンター間接続や通信キャリアの光インフラ構築、欧米における FTTx の整備、6G 通信基地局の設備投資が活発に行われると報告されている。

国際標準化動向としては、1Tb/s 超高速コヒーレント光トランシーバに対応する 150Gbaud 以上の高速変調技術、データセンター間の 3.2T コパッケージ光トランシーバ (100Gbaud 変調器) のユニット小型、集積化・広帯域化技術が議論され、通信機器ベンダーあるいはデータセンター事業者が標準化を進めて行くと考えられる。

本課題の超高速・低消費電力の光変調技術は、実用的な光トランシーバ技術へ応用することで、B5G で必要な「超高速・大容量化を実現する技術」および「超低消費電力を実現する技術」を実現する。超高速・大容量データ伝送のコアとなる光変調技術について、10 テラビット級の光トランシーバを実現し、将来的にマルチコアファイバを用いた空間光多重光伝送技術と組み合わせることにより、100 テラビット級の超高速伝送技術を開発し、電磁波のさらなる有効利用に貢献する。これにより、サイバー空間とフィジカル空間の融合が加速され、デジタルトランスフォーメーションによるコミュニケーション手段の多様化さらには医療などのサービスが充実し、2050 年に目標設定されているゼロエミッション炭素社会の実現に大きく貢献する。

本研究開発項目「集積小型 SPH 技術」はすでに社会実装企業と連携も進んでおり、期待されるアウトプット成果は製品の事業化に活かすことができる。計画では、本研究開発と同時進行で連携企業が開発中の 1Tb/s 級小型光トランシーバの事業化を技術支援し、集積小型 SPH 技術を順調に社会実装できるようにする。本研究開発で目指す最終的なアウトプット目標は、さらに高性能な 10Tb/s 級小型光トランシーバの開発の鍵となり得る要素技術であり、連携企業にスムーズに技術展開することで、アウトカム目標の達成に資する製品開発へと展開する。その具体的目標時期は、研究開発期間中 (2021~2024 年) に 1Tb/s 級小型トランシーバへの技術提供、研究期間終了期 (2024 年以降) に 10Tb/s 級小型トランシーバ開発への技術提供を行う。成果の社会実装に向けては、基盤となる基礎的技術を固め、本研究開発でも進める国際連携やアライアンスの中で技術を高め、実用的デバイスとして発展する予定である。

また、学術への貢献の観点からは、電気光学ポリマー材料である有機分子の超高周波応答に関する研究が挙げられ、将来的には THz 帯の電波信号を光信号に変換する THz 電波光融合技術への展開が期待される。

また、本課題に関わる学生・研究者は、超高速光変調技術・光デバイス設計、さらに高速光信号処理に関する知識と光電融合を利用したデータセンターネットワークへのシステム実装に至る幅広い知識を得ることが可能となり、次世代光通信および SDG s を意識した光デバイスおよび通信システム設計が可能な人材となると期待される。

国民生活の観点からは、超高速・低遅延・低電力通信技術の普及により、Beyond5G が目指しているサイバーフィジカル融合技術を利用することが可能となり、安全・安心かつ脱炭素社会への貢献が期待される。