

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 4 年度は、Si 導波路と EO ポリマーのハイブリッド構造を設計し、ナノリソグラフィー技術を活用してデバイス作製を進めた。特に変調の低電圧化のため構造の最適化と位相変調部の低光損失化のため作製技術の検討を進め、「高効率 SPH の研究開発」課題では基本的な光学特性の評価と変調特性の解析を進め変調電圧の低減を目的とした。SPH の広帯域化を目指して、Si に代わる新しいハイブリッド構造の検討も進めた。「化合物半導体応用 SPH の研究開発」では、光導波路デバイスを作製するための基板選択やその作製方法、およびナノリソグラフィー条件や EO ポリマーとの適合性について検討を行うと共に、世界初の化合物半導体応用 SPH の作製プロセスを開発する。高速変調の信号処理を目的とする「100Gbaud 変調解析の研究開発」では、デバイスを駆動させる高速信号プログラムの作成や得られた信号精度などの解析を行うオフライン復調の高速信号解析プログラムを作成し、SPH の超高速・高精度な信号生成を目指した。本技術は Beyond5G(6G)時代の超大容量光伝送および低消費電力化に有望であると考えられ、世界最高性能の EO ポリマー材料とシリコンフォトリソグラフィ技術を応用することで、100G ポーレートの高性能な光信号生成の実現と光変調デバイスの低消費電力化を目指す。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 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

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 290 百万円 (令和 4 年度 213 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、九州大学)  
(SPH: Silicon and Polymer Hybrid Modulator)

(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       | 3      | 2        |
|       | 外国出願       | 0      | 0        |
| 外部発表等 | 研究論文       | 11     | 7        |
|       | その他研究発表    | 34     | 26       |
|       | 標準化提案・採択   | 4      | 3        |
|       | プレスリリース・報道 | 2      | 2        |
|       | 展示会        | 0      | 0        |
|       | 受賞・表彰      | 0      | 0        |

(7) 具体的な実施内容と成果

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、前年度よりナノリソグラフィ技術を活用して構造最適化した SPH を継続的に作製し、高速変調動作を確認するための高周波応答やデータ伝送の評価実験を進めた。高速変調実験では SPH のさらなる高精度作製に注力して研究開発を進め、100Gbaud 伝送を実証した。「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、SPH の高速変調実験に要する信号制御と復調解析を進め、光データ信号の伝送制度の解析を行った。本年度、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： SPH の構造最適化ではナノリソグラフィ技術による作製実験で、100~200nm レベルのスロット構造を持つ SPH を作製した。作製した SPH の位相長は 1.5mm であり、シリコン光集積化で特徴的である小フットプリント化を実現した。得られた半波長電圧は 0.88V ( $V_p \cdot L = 0.18V \cdot cm$ )、位相変調部の損失は 0.47dB であった。これらの特性は、中間目標値に到達していることから、本年度はさらに 100Gbaud の高速変調を実現することに注力して研究開発を進めた。

高速伝送実験では、50Gbaud 程度から段階的に 100Gbaud までシンボルレートをあげて光変調精度の解析を進めた。高周波数領域の信号入力と受信では、トランスミッタ (送信) 側とレシーバー (受信) 側で両方のデジタルシグナルプロセス (DSP) の調整が必須となる。このため信号源には任意波形成形器 (AWG) を使用し、レシーバー側では DSP が可能な高速デジタルシグナルアナライザとリアルタイムスコープを使って信号解析を行った。定量的な評価は、アイパターンを測定した後に消光比、Q 値、シグナル・ノイズ比 (SNR)、などのパラメータを使って解析を行った。最終的に変調速度が 100Gbaud の信号伝送を実証し、そのときの動作電圧は 1.8Vpp であった。

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、SPH 応用が可能な基板作製とナノ加工技術の条件検討、およびポリマーハイブリッド化の検討を行い、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。高周波電気評価を行い、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。また、SPH の低電力化につながることを期待

できる電極構造を設計・作製し、電力損失が SPH に比較して 3dB 以上小さいことを確認し、世界初の InP 応用 SPH の低電力化を実証した。

1-c 100Gbaud 変調解析の研究開発：本課題では、SPH を低電圧動作で光変調・信号生成し高効率 100Gbaud 伝送を実現することが目標となる。100Gbaud レベルの信号制御技術では、パルス振幅や波形形成を高精度に制御した後に電気信号を SPH に入力する必要がある。また、SPH から発生する変調信号についても、適切なオフライン復調によってデジタルシグナル処理(DSP)が必要となる。本年度は、DSP 開発として、1)効率的な帯域補正のため発信器側のプレエンファシスプログラムとして高周波数端のフィルタリング、2)昨年度に開発した FFE と EDF イコライゼーションアルゴリズムを改良し、AI アルゴリズムの応用についてたたみ込みニューラルネットワークと自己補正プログラムに着手した。開発したイコライゼーションプログラムを用いて、九州大学で実験を進める SPH 変調器の高速動作に適應した。

#### (8) 今後の研究開発計画

Beyond 5G おける高速・大容量通信に向けて、SPH 技術でチャンネル当たり 100Gbaud 以上の高速光信号伝送を実現する。EO ポリマーと Si ハイブリッド導波路の融合技術によって高効率変調器を応用し、産業的にも有用な光トランシーバの超高速化と低消費電力化に貢献する。将来的に、多並列化した大容量データ伝送技術を活用し、100 テラビット級の超高速伝送技術の開発につなげることが目標となる。

研究開発する SPH が持つデバイス性能の最終目標は、以下の通りである。

|          |                    |
|----------|--------------------|
| ○動作波長    | : C 帯および O 帯       |
| ○シンボルレート | : 100Gbaud         |
| ○損失      | : 1dB 以下           |
| ○動作電圧    | : 1Vpp 台           |
| ○信号精度    | : 誤り率 $10^{-5}$ 未満 |

目標の達成と社会実装協力企業による実用化への移行に向けて、「高効率 SPH の研究開発」では、材料とデバイスの両側面から SPH の高性能化を進める。特に光変調の高速化では、SPH の高周波数応答性が重要となるため、等価抵抗と寄生容量を考慮したデバイス設計と作製が必要となる。今後は、100Gbaud 伝送の詳細な解析と信号精度の向上を目指して、デバイス実装実験を進める。SPH の電気光学係数は周波数依存性がないため、ポリマーの電場配向条件をさらに整え高い電気光学効果を誘起することでさらなる高速変調効率の改善を目指す。動作波長に関しては新たに O 帯の検討を進め、適應可能な EO ポリマーを用いて透過率の高い SPH を開発する。

さらに「半導体応用 SPH の研究開発」を進め、Si では原理的に困難なデバイス特性の制限を解決し、SPH に応用する。100Gbaud を超える高速変調では、FFE 及び DFE の信号補正技術の活用は必須である。「100Gbaud 変調解析の研究開発」では、大容量の信号処理に対応するイコライザ機能を活用して、高精度な高速信号伝送を実証する。目標を確実に達成させるため、研究開発では段階的に SPH の効率化を進めていく予定である。令和 5 年度、「高効率 SPH の研究開発」では高速変調の動作電圧を  $2.0V_{DD}$  以下として 100Gbaud の光変調実験を継続して検討する。特にここでは、SPH の RF 応答性が重要となるため、高周波数デバイス設計も取り入れたデバイス作製に取り組む。デバイス特性面では、シリコンに代わりより優れた帯域特性が見込まれる半導体基板の応用が有効である。「高性能半導体応用 SPH の研究開発」では、シリコンハイブリッド技術で得られた知見をもとに高性能半導体基板の応用について検討を進め、SPH のさらなる広帯域化・低電力化を狙う。また、高速データ伝送で必須となる FFE 及び DFE の信号補正技術については、「100Gbaud 変調解析の研究開発」に取り組み、イコライザ機能を高めるため機械学習を応用した方式についても

検討を進める。