

SICORP 日本-ドイツ

「オプティクス・フォトンクス」領域 第1期 事後評価報告書

1 共同研究課題名

「高性能電気光学ポリマーを使った高効率シリコン光デバイス」

2 日本一相手国研究代表者名（研究機関名・職名は研究期間終了時点）：

日本側研究代表者

横山 士吉(九州大学 先導物質化学研究所・教授)

ドイツ側研究代表者

コース・クリスチャン(カールスルーエ工科大学、光量子エレクトロニクス研究所・教授)

3 研究概要及び達成目標

Beyond5G 技術で必要な高速データ送信デバイスの高機能化とシリコンプラットフォームへの集積化技術の開発を目的として、集積性に優れたシリコン光デバイスに電気光学ポリマーを応用することで小型・超高速・低消費電力の超高速光変調デバイスを開発する。また、国際的な産学連携チームで共同研究を行うことでデバイス信頼性、光配線、パッケージングなどの技術課題にも取り組む。日本側チームとドイツ側チームによる連携では、材料とデバイス分野の異分野の研究融合のもと、大学による学術的な成果発信と企業によるデバイス信頼性や実装技術などの実用的課題を進めることで学協会や産業界にもインパクトを与えるデバイス研究開発に展開する。

4 事後評価結果

4.1 研究成果の評価について

4.1.1 研究成果と達成状況

本課題は、集積性に優れたシリコン光デバイスに電気光学ポリマーを応用することで小型・超高速・低消費電力の光変調器を作製し、デバイス信頼性、光配線、パッケージングなどの技術課題に取り組むことで実用的な光デバイスの開発につなげる。最終的な目標とするシリコン変調器（SOH）の性能は、実験室評価でシンボルレート **100Gbaud** の達成を目指し、熱安定性は **85°C**、さらに **105°C** の高温安定性を狙った。また、プロトタイプ試験(TRL7)に準ずるプロトタイプを実現するため、SOH のデバイス制御が可能な PCB 電気制御系についても評価ボードの探索および試作を進めた。ポリマー変調器に原理的に期待される広帯域性、低電圧動作、超低消費電力の光変調特性を実証することに成功した。

特に日本側は、高性能電気光学(EO)ポリマーの開発と変調器への応用、及び実用的な材料製造技術について検討を行った。そして、高い EO 係数とガラス転移温度が高い EO ポリマーの開発を進め、**170°C**以上の熱安定性に優れた EO ポリマー(EO172)を合成した。また、電気光学特性の向上と O-通信波長帯

(O-band)の対応が可能な材料合成を行った。さらに、日本側共同開発の、EOポリマー(EO172)を用いた SOH の作製を進め、動作電圧特性と高速光変調特性、および熱信頼性試験を行った。日本側で行った SOH は、材料とデバイス改良を経て段階的に高速化が進み、最終的にシンボルレート 120Gbaud の変調特性と伝送レートでは最高 200Gbit/s を得ることができている。開発した EO ポリマーは熱信頼性に優れており、105℃の温度耐久性や高温時のデバイス動作でも安定な信号生成を確認することができた。また、信号精度(BER：ビットエラーレート)の評価から、信号エラー閾値となる Pre-HD-FEC または PRE-KP4-FEC 未満の BER 値が確認できた。更に、ポリマー光変調器で初めて Telcordia 規格をクリアした事は特筆すべき成果である。

以上のことから、本課題で生み出された光変調技術は、B5G や IoT の通信技術に必須であり本課題の技術レベルは高いと考えられる。最終目標の高性能・高信頼性モジュールの作製ができており、当初目標は達成したと言える。さらに、日本側は、シンボルレート 120Gbaud の変調特性と伝送レートでは最高 200Gbit/s を達成できた。

4.1.2 国際共同研究による相乗効果

以前より日本側チームでは産学で連携し、EO ポリマーの開発に注力して研究を進めてきており、光変調器への応用に関しても研究を実施していた。しかし、材料技術を活用した高性能デバイスの実現を加速化するためには、優れたデバイス技術を持つ研究チームとの連携が必要であった。一方、ドイツ側チームは、学術誌上で世界最高レベルの光変調性能を実証していたが、デバイスの信頼性が得られるような材料の開発が必要であった。そして、双方で不足していた技術を相互補填できると考えられ、本国際共同研究が発足した。

共同研究の結果、本研究の高効率シリコン光デバイスは、これらの材料コンセプトとデバイスコンセプトを兼ね備え、原理的に>150GHz の帯域特性、低電圧動作(1V 以下)、超低消費電力(フェムトジュール/bit)の変調特性を実現することができた。得られた特性は、近年のシリコンや化合物半導体を用いた最先端光変調器の性能を超えるものであり、九大と KIT による材料-デバイス技術の連携で達成することができた。単独チームでは到達困難であったデバイス性能の到達と、デバイス信頼性につなげることができた。

なお、産学連携の構成では、材料メーカーとして NCC 社が加わることで遅延のない EO ポリマーの供給を実現することができ、VA 社においても有用な光学部材を得ることができている。

4.1.3 研究成果が与える社会へのインパクト、我が国の科学技術協力強化への貢献

現在、5G や IoT などの通信技術の高速化・高機能化、および 2030 年ごろに実用化を狙う Beyond5G に向けた超高速情報通信に向けて、高速データ送信デバイスの高性能化とシリコンプラットフォーム上への集積化の開発が産業界を中心に活発に行われている。本共同研究のポリマーとシリコンハイブリッド技

術を応用した光変調器は、学会のみならず産業界でも大きな注目を集めている。特に産業界からは高性能な光変調の実証のみならず、デバイス信頼性に関する実用的な課題解決への要望も高まっており、本研究の社会へのインパクトは大きいと考えられる。

今後の展開としては、日本側は、**JST A-STEP(2019.10~2022.3)**「1Tb/s 級動作フォトニクスポリマー集積小型光デバイスの実用化技術開発」(富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社(FOC 社)との共同研究)や**NICT Beyond5G 研究開発促進事業(2021.11~)**「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 ハイブリッド変調記述の研究開発」(徳島大学、会津大学、他社会実装協力企業との共同研究)等、後継プロジェクトへつなげており、着実な社会実装が待たれる。

一方、ドイツ側も **SiloriX 社** (大学発ベンチャー)を立ち上げ、**SOH** のチップ販売に向けた事業を開始しており、九大と **NCC** も協力し将来展開が大いに期待できる。

4.2 相手国研究機関との協力状況について

2019 年まで毎年、相互に研究場所を訪問し、合同チームミーティングを実施した。2020 年以降は **COVID-19** の影響で開催が困難となったが、情報交換は **web** 会議システムを使って進められ、大学間では延べ **15** 回以上の進捗報告会を行った。また、九大の大学院生が大学のインターンシップ制度を活用して **3** カ月間 **KIT** に滞在し、**SOH** のシミュレーション設計や光学測定などを行い、帰国後、継続して研究を進めるとともに学位(博士)の取得している。また、**KIT** 側大学院生の研究活動に関しても、専門外の化学的知識を習得につなげることができた。さらには、研究参加者が一同に集まる合同チームミーティングを合計 **3** 回実施している (**KIT** で **2** 回、九大で **1** 回)。共同研究先を訪問しての研究交流は、独自には対応が困難であった課題解決につながった。

4.3 その他

本共同研究の期間中には、情報通信分野の **High Quality Conference** として知られる **OFC** (招待講演,2019,2020) や **ECOC** (2019)などでの報告につながっている。変調器の高速化は最高で **200Gbit/s** データ伝送に達し、**Nature Communications** の掲載に加えて、**Nature Communications Editor Pick** や **Nature Electronics Research Highlight** で取り上げられている。