

## 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本-ドイツ国際産学連携共同研究

終了報告書 概要

1. 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. 研究期間：2018年10月～2022年3月
3. 主な参加研究者名：  
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	横山 士吉	教授	九州大学	全体研究取りまとめ
主たる共同研究者	小澤 雅昭	部長	日産化学株式会社	企業側研究取りまとめ
研究参加者	佐藤 洸	研究員	九州大学	デバイス開発
研究参加者	バンアロン アリサ	研究員	九州大学	材料開発
研究参加者	大島 寿郎	主査	日産化学株式会社	デバイス開発
研究参加者	菓子野 翼	主事	日産化学株式会社	デバイス開発
研究期間中の全参加研究者数			24名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Christian Koos	Professor	Karlsruhe Institute of Technology	Overall research summary
主たる共同研究者	Alois Hauk	CEO	Vanguard Automation GmbH	Overall industry summary
研究参加者	Yasar Kutuvantavida	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
研究参加者	Clemens Kieninger	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
研究参加者	Heiner Zwickel	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
研究参加者	Adrian Mertens	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
研究期間中の全参加研究者数			11名	

## 4. 国際共同研究の概要

5G や IoT などの通信技術の多様化、また 2030 年頃に導入が見込まれる Beyond5G に向けて、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の開発が活発に進められている。本国際共同研究では、既存のデバイス技術の延長では到達が困難な超高速光変調技術を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作製し、小型・超高速・低消費電力の光変調特性を実証するとともに、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を目的とした。また、国際的な産学連携チームで共同研究を行うことで、実用的な光デバイスの開発につなげることも目標の一つである。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

バイス研究開発に展開することができた。

## 5. 国際共同研究の成果

### 5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

本研究で目指す高効率シリコン光デバイスの開発では、ポリマー変調器が原理的に持つ広帯域性、低電圧動作、超低消費電力の光変調特性を実証することができた。得られたハイブリッド光変調デバイスは、小フットプリントの光集積性にも優れており、現在の最先端の光ファイバ通信技術で求められる光トランシーバ開発に向けた、革新的な材料・デバイス技術として産業界からも注目を集めている。得られた学術的な成果は、日本側とドイツ側とともに実用化に向けた開発へと展開し、本共同研究の特徴でもある国際的な産学連携の特徴を活かすことができた。

### 5-2 国際共同研究による相乗効果

本国際共同研究行った研究開発課題は、高性能 Si ハイブリッド型/ポリマー光変調器の開発とその実用化検討のため、日本側チームが保有する材料コンセプトとドイツ側チームが保有するデバイスコンセプトを融合して立案・実施した。その結果、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。共同研究の背景には、研究者と大学院生の相互交流、合同チームミーティング、国際会議を活用したワークショップ開催、博士大学院生の学位審査、またコロナ渦においては web 会議を活用し研究の活発化を維持した。

### 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

国際共同研究の成果は、5G や IoT などの通信技術の多様化、または 2030 年ごろに導入される Beyond5G の関連技術として波及効果が高い。ポリマー変調器の実用化は、産業界からも広く望まれているが、Si ハイブリッドポリマー光変調器の実用化に向けて日本側チームとドイツ側チームは、それぞれ開発を進めている。日本側チームでは、デバイスメーカーと連携した実用化開発に展開した。ドイツ側チームでは、大学発ベンチャー企業を立ち上げ、チップの実用化研究を開始した。今後も協力関係を継続し、研究開発を進める。本国際共同研究では、多数の大学院生も参加し高い教育効果をもたらし、若手研究者の人材育成にもつながった。長期インターンシップの実施、共著論文の発表、および学位審査等をあげることができる。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)  
Japan – German Joint Research Program  
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Efficient Silicon Photonic Devices Using Advanced Electro-Optic Polymers」
2. Research period : 10/2018 ~ 03/2022
3. Main participants :  
Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Shiyoshi Yokoyama	Professor	Kyushu University	Overall research summary
Co-PI	Masaaki Ozawa	General Manager	Nissan Chemical, LTD	Industry research summary
Collaborator	Allissa Bannaron	Researcher	Kyushu University	Material research
Collaborator	Hiromu Sato	Researcher	Kyushu University	Device research
Collaborator	Juro Oshima	Researcher	Nissan Chemical, LTD	Material research
Collaborator	Tsubasa Kashino	Researcher	Nissan Chemical, LTD	Material research
Total number of participants throughout the research period:				24

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Christian Koos	Professor	Karlsruhe Institute of Technology	Overall research summary
Co-PI	Alois Hauk	CEO	Vanguard Automation GmbH	Overall industry summary
Collaborator	Yasar Kutuvantavida	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
Collaborator	Clemens Kieninger	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
Collaborator	Heiner Zwickel	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
Collaborator	Adrian Mertens	Scientific staff	Karlsruhe Institute of Technology	Device research
Total number of participants throughout the research period:				11

4. Summary of the international joint research

With the recent convenience of communication technologies in 5G and IoT, and future Beyond 5G technologies, optoelectronics technologies have been actively promoting the development of high-performance data transmission and its integration into silicon platforms. This international collaboration aimed to develop the ultra-fast optical modulation technology using the hybrid electro-optical polymers to silicon optical devices.

with excellent integration, making it compact and compact. The purpose is to demonstrate the high-efficient optical modulation with the minimum electric power and address technical issues such as device reliability, optical connecting, and packaging. We joined as an international industry-academia collaboration team to perform the industry reliable optical devices. For this purpose, Japanese and German teams worked together to promote practical issues such as device reliability and device integration based on the various technological backgrounds of materials and devices.

## 5. Outcomes of the international joint research

### 5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

In the development of high-efficiency silicon optical devices aimed at in this research, we have developed highly efficient silicon-organic-hybrid polymer modulators based on the material concept of the Japanese team and the device concept of the German team. The modulators are characterized by the wide bandwidth and low voltage driving. We were able to demonstrate the modulations with the small voltage operation and ultra-low power consumption. The obtained modulators are explored into further development of optical integration with a small footprint. From the viewpoints of the industry development, an innovative material and device technology toward optical transceivers is required in the current state-of-the-art optical fiber communication technology. The academic results obtained were developed together with the Japanese and German sides and were able to be obtained due to the advantage of industry-academia collaboration.

### 5-2 Synergistic effects of the joint research

This international joint research is planned and implemented by combing the material concept owned by the Japanese team and the device concept owned by the German team. The target of the research is to develop of the high-performance and high-reliable Si and polymer hybrid optical modulator. As a result, we were able to achieve device performance and device reliability that were difficult to reach with a single team. Behind the collaboration we performed mutual interactions between researchers and graduate students, joint team meetings, holding workshops utilizing international conferences, degree examinations for doctoral graduate students, and lively research discussions utilizing web conferences.

### 5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

The results of this joint research have a high ripple effect in the communication technologies such as 5G and IoT, or Beyond 5G. The practical application of polymer modulators is widely desired by the industrial side. The Japanese team has expanded to practical development in collaboration with the device team. The German team launched a venture company and started research on the practical application of modulator chips. We will continue to cooperate and promote research and development. Many graduate students also participated in this international research with a high educational effect, which led to the development of human resources for young researchers. Activities include conducting long-term internships, publishing co-authored dissertations, and degree exams.

## 国際共同研究における主要な研究成果リスト

## 1. 論文発表等

\*原著論文 (相手側研究チームとの共著論文) 発表件数 : 計 2 件

・査読有り : 発表件数 : 計 2 件

1. A verified equivalent-circuit model for slotwaveguide modulators, Heiner Zwickel, Stefan Singer, Clemens Kinnger, Yasar Kutuvantavida, Nark Muradyan, Thorsten Wahlbrink, Shiyoshi Yokoyama, Sebastian Randel, Wolfgang Freude, and Christian Koos, *Optics Express*, 28, 12951-12978 (2020), DOI: 10.1364/OE.383120
2. Demonstration of long-term thermally stable Silicon-Organic Hybrid Modulators at 85 °C, Clemens Kieninger, Yasar Kutuvantavida, Hiroki Miura, Juned N. Kemal, Heiner Zwickel, Feng Qiu, Matthias Lauermann, Wolfgang Freude, Sebastian Randel, Shiyoshi Yokoyama, and Christian Koos *Optics Express* 26, pp. 27955-27964 (2018), DOI: 10.1364/OE.26.027955

\*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文) : 発表件数 : 計 X 件

・査読有り : 発表件数 : 計 8 件 (他 12 件)

1. Efficient Silicon and Side-cladding Waveguide Modulator with Electro-optic Polymer, Jiawei Mao, Hiromu Sato, Alisa Bannaron, Jianxun Hong, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama, *Optics Express* 30 (2) pp. 1885-1895 (2022), DOI: 10.1364/OE.447616
2. A 100 Gbaud On-off-keying Silicon-Polymer Hybrid Modulator Operating at up to 110°C, Hiromu Sato, Jiawei Mao, Alisa Bannaron, and Takuro Kamiya, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama, *IEEE Photonics Technology Letters* 33 (24) pp. 1507-1510 (2021) , DOI: 10.1109/LPT.2021.3126945
3. Frequency correlated photon generation at telecom band using silicon nitride ring cavities, Zhenghao Yin, Kenta Sugiura, Hideaki Takashima, Ryo Okamoto, Feng Qiu, Shiyoshi Yokoyama, and Shigeki Takeuchi, *Optics Express* 29 (4) pp. 4821-4829 (2021) , DOI: 10.1364/OE.416165
4. Power-Efficient O-Band 40 Gbit/s PAM4 Transmitter Based on Dual-Drive Cascaded Carrier-Depletion and Carrier-Injection Silicon Mach-Zehnder Modulator With Binary Driving Electronics at CMOS Voltages, Guo-Wei Lu, Hong-Bo Zhang, Satoshi Shinada, Jianxun Hong, Yongpeng Cheng, and Shiyoshi Yokoyama, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27 (3), 1-8 (2021) , DOI:10.1109/JSTQE.2021.3056721
5. High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit s<sup>-1</sup> for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications, Guo-Wei Lu, Jianxun Hong, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Tsubasa Kashino, Juro Oshima, Masa-aki Ozawa, Hideyuki Nawata, and Shiyoshi Yokoyama, *Nature Communications*, 11, 4224 1-7 (2020). DOI: 10.1038/s41467-020-18005-7
6. A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with multilayer bottom reflector, Jianxun Hong, Andrew M. Spring, Feng Qiu, and Shiyoshi Yokoyama, *Scientific Reports* 9, 12988 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-49324-5
7. Adamantyl and carbazole containing trans-poly(norbornene-dicarboximide)s as electro-optic chromophore hosts, Andrew M. Spring, Feng Qiu, Jianxun Hong, Alisa Bannaron, Xiaoyang Cheng, and Shiyoshi Yokoyama, *Polymer* 172, 382-390 (2019), DOI: 10.1016/j.polymer.2019.04.015
8. Camera sensor platform for high speed video data transmission using a wideband electro-optic polymer modulator, Xiaoyang Cheng, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Masaru Sasaki, Tsubasa Kashino, Masaaki Ozawa, Hideyuki Nawata, Tomohiro Kita, Okihiro sugihara, and Shiyoshi Yokoyama, *Optics Express* 27, 1877-1883

(2019), DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.27.001877>

・査読無し：発表件数：該当なし

\*その他の著作物（相手側研究チームとの共著総説、書籍など）：該当なし

\*その他の著作物（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など）：  
発表件数：計 2 件(他 5 件)

1. シリコン/ポリマーハイブリッド型の光変調器を用いた高速信号伝送、  
Microoptics News, 2022.
2. 高効率ポリマー変調器、光学(日本光学会)、2021

## 2. 学会発表

\*口頭発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 2 件

\*口頭発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）

発表件数：計 38 件（うち招待講演：24 件）

\*ポスター発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 0 件

\*ポスター発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）

発表件数：計 24 件

## 3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. “Future Photonics Devices and Materials for Optical Communications” Optical Fiber Communications Conference (OFC 2019), San Diego, USA, 2019.3.2
2. “Optical Components for fJ/bit Exascale Computing: How and When?” Workshop Optical Fiber Communications Conference (OFC 2020) San Diego, USA, 2020.3.8

## 4. 研究交流の実績（主要な実績）

### 【合同ミーティング】

- ・2018.9：キックオフミーティング、KIT、Karlsruhe, ドイツ
- ・2019.1：合同チームミーティング、九州大学、福岡、日本
- ・両国のチームメンバーを交えて Teams ミーティング(合計 12 回以上)

### 【大学院生の派遣】

- ・2018.12～2019.2：日本から大学院生が KIT へ研究インターンシップで留学。研究内容は学位論文の一部に含まれた。

### 【学位論文審査】

- ・2020.12：日本側研究代表者が、ドイツ側博士大学院生の学位論文審査の副査を行った。

## 5. 特許出願

研究期間累積出願件数：2 件

## 6. 受賞・新聞報道等

- ・日刊自動車新聞「電気光学ポリマーで超高速光変調器を開発」2020年9月7日
- ・電波新聞「【新技術】九州大学の研究グループ 毎秒200Gビットの光データ伝送に成功」2020年11月17日
- ・その他5件

**7. その他**  
該当なし