

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00770

研究課題名（和文）ハイブリッド電気光学導波路による広帯域光変調器の作製

研究課題名（英文）Large bandwidth optical modulation of hybrid electro-optic waveguide modulator

研究代表者

横山 士吉（Shiyoshi, Yokoyama）

九州大学・先導物質化学研究所・教授

研究者番号：00359100

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、シリコン導波路と電気光学ポリマーを組み合わせたハイブリッド型変調器を作製し、高効率な光信号生成を目指し進行波型電極を適応した広帯域変調の評価と解析を進めた。その結果、シンボルレートが100Gbaudの信号生成を実現し、200Gbit/sの信号伝送を実証することができた。生成した光信号の定量的評価では、信号誤り率の解析を光ファイバー伝送の条件下で行い、エラーフリーの信号精度を確認するとともに、110℃までの温度負荷をかけても信号精度の劣化が生じないことを確認した。最終的に本研究の目標となる高速光変調デバイスを作製し、高効率な光変調性能を実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

年、短距離～長距離光ファイバー通信分野で、データ伝送量の増加に対応するため高いシンボルレートの変調技術の開発が強く望まれている。しかし、100Gbaudを超える光変調が可能な実用的なデバイスは限定的であり、既存の材料・デバイス技術の延長では容易に到達することは困難な状況にある。このような背景のもと、本研究ではハイブリッド光変調器の研究を進め、高精度な高速信号の生成やデバイス信頼性の向上につながる研究成果を得ることができた。得られた成果は、光ファイバー通信分野において産業界からの期待にも応え得るものであり、学術的な知見の取得のみならず産業界への貢献にもつなげることができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we fabricated a polymer hybrid modulator using silicon waveguide, which consists of a traveling wave type electrode for highly efficient optical signal generation. The measured results of the modulation demonstrated symbol rate of 100 Gbaud and signal transmission of 200 Gbit/s. In experiments of the optical signal transmission, the signal error rate was analyzed as below the error-free accuracy, and it was confirmed that the signal transmission did not degrade even when subjected to temperature up to 110°C. As the goal of this research, a high-speed optical modulation device was fabricated and its highly efficient optical modulation performance was demonstrated.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光変調器 電気光学 ポリマー シリコン導波路 信号伝送 高速変調 進行波型電極

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速化と多様化が進む短・中距離光ファイバー通信技術において、光イーサネットの速度は400ギガイーサ(GbE)の実用的開発から1.6テライーサ(TbE)の技術展開と課題の議論が進められ、ますます幅広い産業分野でのネットワーク活用技術の広がり期待が集まっている。アプリケーションによるIoTでも、コネクテッドホームやコネクテッドカーなど急速の成長率が予測されている。また、効率の高いITインフラ設備を持つデータセンターのハイパースケール化も進み、イーサネット用光トランシーバーの開発ロードマップでは、2030年には3.2TbEのリンクスピードの達成が記されている。

光通信機器の信号生成速度は、電気-光変換を担う光トランシーバーの性能に依存し、これまで光ファイバー通信技術の中で適切なデバイス選択がなされてきた。特に中・短距離伝送用途で注力される小型・低消費電力化技術ではシリコン光技術と融合した光トランシーバーも実現し光インターフェースの高性能化につながっている。

産業界を中心としたイーサネット標準化の策定では、400GbEの通信サービスの実現の後、次世代0.8~1.6TbEへの対応、さらに10TbE級の展開が求められるなどその開発構想は明確である。一方、これらを実現する光インターフェースの開発は、既存の最先端技術を結集しても対応できるものばかりでなく、例えば10テラビット級光インターフェースを構成する超高速機器の開発では、革新的な材料・デバイスに関する研究シーズも実用化の鍵となり、将来に向けた技術開発が活発に進められている。特に先端的な光トランシーバー開発では、規定サイズモジュール内への集積性と高速化、すなわち小フットプリント化を一層進めるとともに、高性能化に伴うデバイスの発熱や使用電力の抑制も重要な開発要素となる。

2. 研究の目的

本研究のハイブリッドEO変調器は、シリコン導波路とEOポリマーの複合構造を持ち、屈折率が高いシリコン導波路への強い光モード閉じ込め効果を応用した高効率電気光学変調器である[1]。数十GHzを超える高速変調器は、導波路内を伝搬する光波とマイクロ波の位相速度差(速度整合)を最小限にすることが重要であり、本研究では速度整合の完全一致を実現して周波数応答(帯域)を100GHz以上に拡大し、高速光信号伝送を実証することを目的とした。一般的に導波路変調器の速度整合性は部材固有の屈折率や誘電率に支配的であるため速度整合の調整には限界があり、特に無機系変調器では帯域の大幅な拡大は困難である。一方、本研究のハイブリッド構造では、実効屈折率がシリコンとポリマーで構成される導波路の光モードバランスで決まる。ここで、シリコンとポリマーはそれぞれ屈折率と誘電率の大きなコントラストをもつことから、光モードバランスを調整することで導波路の実効屈折率の調整が可能となる。ハイブリッドEO変調器を用いた高速光伝送の実証実験では、シンボルレートの解析による変調特性の解明と4値パルス振幅変調方式による高速データ伝送を行った。最終的にこれら的高速変調特性を実現することで高速・低電圧動作の高効率ハイブリッド変調器を実現することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、まず光変調の帯域拡大に焦点を絞り研究に着手した。光変調器の設計では、光伝搬法を使ってシリコン導波路とEOポリマーによるハイブリッド変調器の構造を決定した。光変調器の周波数応答性は、70GHzまでの高周波応答S₂₁パラメータをネットワークアナライザを用いて解析した。一方、100GHz以上の帯域評価は技術的にも難しいことから、サイドバンドスペクトル法による変調度の評価を行い、高周波数応答性の評価を行った。特にデバイス作製実験では、高周波領域の変調効率を上げるため電極部の重要性にも着目した進行波型電極の作製も進めた。

ハイブリッドEO変調器の光伝送実験では、研究開始後、実験系の立ち上げを進め100Gbit/s PERBS信号の生成と変調器への入力方法を考案した。変調器の性能評価は、アイパターン測定による信号/雑音比やビット・エラー測定による定量的な測定を行った。本研究で期待される研究成果のインパクトは、シングルドライブの光変調器を用いてシンボルレートが100Gbaud以上の光信号の生成を実証することである。高精度の光伝送評価系の構築を進めるとともに、送信側と受光側に分け、送信側では最高で100Gbit/sの入力電気信号の生成、受光側では同レートの高感度光検出とアイパターン測定を可能にした。高周波数領域において、信号電圧は光変調器の電極入力時に最も減衰することが予想される。高周波数領域の50インピーダンス電極の検討や電極作製方法の改良も進めながらマイクロ波伝送損失の低減で変調効率を高めた。

4. 研究成果

図1にハイブリッド変調器の周波数応答性の評価結果を示す。本変調器では、導波路に形成する光伝搬モードの広がりを抑えるため、シリコン導波路上にE0ポリマーとSiO₂をクラッド層として形成している。光導波路の作製はシリコン薄膜を応用しており、E0ポリマーを厚さ40nm程度のシリコン導波路上に被覆したハイブリッド型構造を持っている。シリコンとE0ポリマーの屈折率を考慮し、導波路構造を最適化することで界面近傍にシングルモードが形成され、光電場はE0ポリマー中に大きく染み出すため光変調することができる。E0ポリマーは高い熱安定性を持ち(ガラス転移温度172)、電場配向後の分子配向性は105で2000時間以上保持しても保持されることが確認できている[2]。マツハツェンダー干渉型光変調器の位相変調部には進行波型電極が形成され、高周波数の変調のためマイクロ波信号を入力することができる。S21パラメータとして示される電気光学変調の周波数応答性を70GHzまで評価したところ、-3dBに変調度が低下する周波数は68GHzであることが確認されている。ポリマー光導波路はキャリア光と入力信号の間で高い速度整合性を持つことから、作製した電極の不完全性を考慮し、電極に起因する信号損失の補正を行うと光変調の周波数依存性は70GHz程度までほとんどなくなり、ポリマー変調器の優れた周波数応答性が示されている。

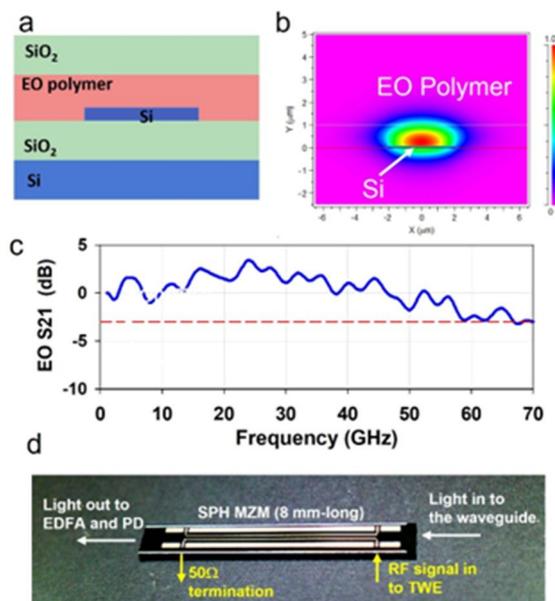


図1. E0ポリマーを用いた高速光変調器。(a)光導波路断面構造、(b)光導波路モード分布、(c)周波数帯域特性、(d)ポリマー変調器(写真)。

ハイブリッド変調器は高速信号生成でも特徴的な高速変調特性を示すことを確認した。光信号レートの基本的な指標となるシンボルレートはOOK(On-OFF-Keying)様式の伝送実験で評価を行った。図2aは、120Gbit/sのレートで光信号生成したときのアイパターンである。信号のSN比を示すQ値は20dB以上を持つことから精度の高い光信号が生成していると確認できる[3]。また、生成データの精度(信号誤り率)の解析としてビットエラーレート(BER)を用いると、100Gbit/s OOKでは $BER=3.9 \times 10^{-6}$ であった。標準化された光ファイバー通信では、伝送信号の精度は規格化されており、誤り率の閾値として $BER=3.8 \times 10^{-3}$ 未満を規定している。E0ポリマー変調器から得られた光信号のBERは、この閾値より3桁低く、高精度な高速信号が生成しているということが分かる。また、高速変調時の動作電圧は1.9Vであるが、MZI変調器の二つの電極を使った差動電圧動作を行えば、半分値に相当する1V以下の低電圧変調も可能となる。

高速信号伝送が重要となるデータセンターなどの短・中距離信号伝送技術では、ビット当たりの消費電力やコストが低い高次の変調(多値化)による効率的なデータレートの拡大が求められている。1ビット伝送方式のOOKに対して、パルス振幅変調方式を用いると、複数値のビット信号を同時に生成することができたため、広帯域変調器を用いると高効率に信号伝送量の拡大が可能となる。例えば4値パルス振幅変調(PAM4)は、シンボル当たり2ビットのデータ伝送が可能であり、OOKに対して2倍の伝送量を送ることができる。一方、PAM4はOOKと比較してビット当たりの変調振幅が1/3となるために、ビットエラーが大きくなる傾向がある。従って、変調度と変調効率が高い光変調器を用いることが重要となる。ハイブリッド変調器はこの特性を備えたデバイスであることから、パルス振幅変調方式によるデータ伝送に有利であると考えられる。図3bは、ハイブリッド変調器を用いてPAM4変調を行ったときのアイパターンの結果である。データレートは200Gbit/sとなる。ア

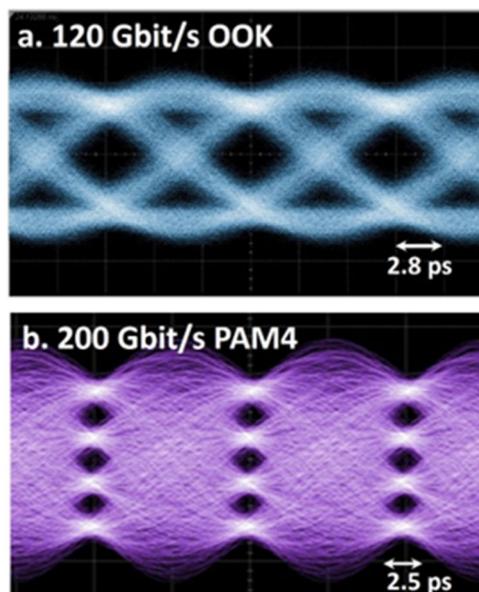


図2. E0ポリマー変調器の高速変調アイパターン。(a)伝送速度120Gbit/s(OOK)、(b)伝送速度200Gbit/s(PAM4)。

イパターンの開口は明確であり、高効ビットエラー信号が生成していることが分かる。ビットエラー解析から 200Gbit/s PAM4 は $BER=1 \times 10^{-3}$ 以下であり、信号エラーもないことが確認できる。実現した 200Gbit/s PAM4 のビット当たりの消費電力を算出すると、動作電圧が 1.3Vpp (電気信号の振幅電圧) であることから、1 ビットあたり 42 フェムト・ジュールとなる。低消費電力シリコン変調器がピコ・ジュールレベルのビット当たりの消費電力であることから、E0 ポリマー変調器が優れた低消費電力特性を持つことが分かる。本研究で作製したハイブリッド変調器の高効率化と高速化は、今後の変調器開発に向けた新技術応用につながることを期待できる。一方、産業からは基礎的な学術研究にとどまらず、実用的な開発へと展開することも期待されている。ポリマーを使った光デバイスの信頼性向上は重要な課題である。本研究の E0 ポリマーは高い熱安定性を有し、光変調器は 85 /2000 時間、および 105 /2000 時間の温度保持試験後も特性の劣化はない。本研究では、高速変調時の動作環境変化(温度)に対する安定性について評価を行った。図 3 はハイブリッド変調器を使って 100Gbit/s OOK および 200Gbit/s PAM4 で変調動作をしながら温度を 22 から 105 まで変化させたときのアイパターンと BER 評価を行った結果である。各温度でアイパターンに大きな変化はなく、定性的に高温でも安定に変調動作を続けていることが分かる。図 4 に示す通り、詳細の解析は BER 測定によって定量的に行った。その結果、70 までは信号精度は全く変わらず、光変調器の動作劣化がないことが確認できた。90 では約一桁の信号精度の劣化が生じ、110 ではさらに半桁程度の劣化が生ずる。しかし、BER 値は十分に高い精度を示しており、E0 ポリマー変調器は高温動作に対して高い耐性を有していることが確認できた。また、110 から 25 に戻した場合には、もとの BER 特性に回復することも確認できている。熱安定性に加えてその他の環境試験(高温多湿試験、冷熱衝撃試験)でも E0 ポリマー変調器の安定性が確認できた。

本研究では、主に進行波型電極を応用した高速変調器の作製を進めた。得られた成果は、他の導波路構造を持つ高効率変調器の開発にもつながり[5,6]、特にシリコン光デバイスと同一基板上に集積可能なコプレー型変調器やシリコンスロットを使った新たなハイブリッド構造へと展開した。今後、高速伝送と低電圧動作の特徴に小型化を付与した変調器への開発へと応用する。

参考文献

- [1] Low Driving Voltage Mach-Zehnder Interference Modulator Constructed from an Electro-optic Polymer on Ultra-thin Silicon with a Broadband Operation, Hiromu Sato, Hiroki Miura, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Tsubasa Kashino, Takamasa Kikuchi, Masa-aki Ozawa, Hideyuki Nawata, Keisuke Odoi, and Shiyoshi Yokoyama, Optics Express 25, pp. 768-775 (2017).
- [2] High thermal stability 40 GHz electro-optic polymer modulators, Hiroki Miura, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Tsubasa Kashino, Takamasa Kikuchi, Masaaki Ozawa, Hideyuki Nawata, Keisuke Odoi, and Shiyoshi Yokoyama, Optics Express 25, 28643-28649 (2017)
- [3] High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit s⁻¹ for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications, Guo-Wei Lu, Jianxun Hong, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Tsubasa Kashino, Juro Oshima, Masa-aki

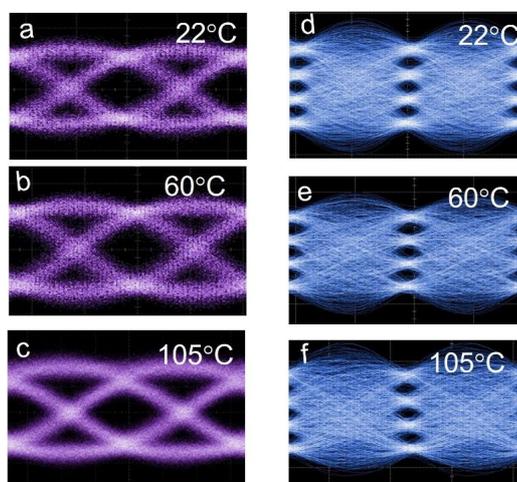


図3 EOポリマー変調器を用いた変調特性の温度依存性(アイパターン)。(a-c)100Gbit/s OOK (温度 22、60、105)、(d-f)200Gbit/s PAM4 (温度 22、60、105)

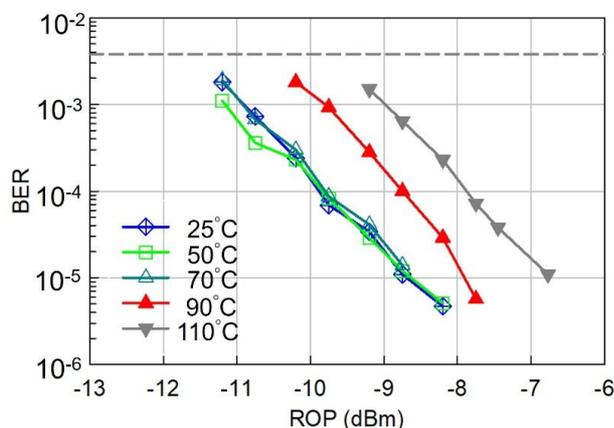


図4 EOポリマー変調器を用いた100Gbit/s OOK信号誤り率(BER: Bit Error Rate)の温度依存性(25 ~ 110)。

- Ozawa, Hideyuki Nawata, and Shiyoshi Yokoyama, *Nature Communications*, 11, 4224 1-7 (2020).
- [4] A 100 Gbaud On-off-keying Silicon-Polymer Hybrid Modulator Operating at up to 110°C, Hiromu Sato, Jiawei Mao, Alisa Bannaron, Takuro Kamiya, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama, *IEEE Photonics Technology Letters* 33 (24) pp. 1507-1510 (2021).
- [5] 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).
- [6] 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).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Jianxun Hong, Kenta Rokumyo, Jiawei Mao, Alisa Bannaron, Hiromu Sato, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 30
2. 論文標題 Efficient four-wave mixing wavelength conversion in hybrid silicon and polymer microring resonator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 45499-45507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.475748	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Jiawei Mao, Hiromu Sato, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 7
2. 論文標題 Heterogeneous silicon-on-lithium niobate electro-optic modulator for 100-Gbaud modulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 126103 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0109251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 HyunSuk Park, Sahar Alasvand Yazdani, Fatima Bencheikh, Ryutaro Komatsu, Shiyoshi Yokoyama, Takuro Kamiya, Chihaya Adachi	4. 巻 132
2. 論文標題 Control of emission diffraction angles and laser threshold in mixed-order sampled distributed feedback laser with organic gain media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 20310-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0123476	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Alisa Bannaron, Hiromu Sato, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 17
2. 論文標題 Organic Electro-optic (EO) Modulator for O-band Intra-datacenter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Xplore OECC	6. 最初と最後の頁 TuP-D-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Futa Uemura, Jiawei Mao, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 17
2. 論文標題 Epitaxial Electro-optical Thin Film and Waveguide on SiO ₂ /Si Substrate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Xplore OECC	6. 最初と最後の頁 TuP-D-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/OECC/PSC53152.2022.9849935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Junichi Fujikata, Masataka Noguchi, Tomoki Sakuma, Daisuke Okamoto, Yasuhiko Ishikawa, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 17
2. 論文標題 High Performance Si Photonics Devices and InP/E ₀ Polymer Hybrid Optical Modulator for Data Communication and Computing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Xplore OECC	6. 最初と最後の頁 TuD1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiawei Mao, Futa Uemura, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 17
2. 論文標題 Design and Fabrication of MZI E ₀ Modulator Based on Spin-on Epitaxial Photonic Materials Platform	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Xplore OECC	6. 最初と最後の頁 TuP-D-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiawei Mao, Hiromu Sato, Alisa Bannaron, Jianxun Hong, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 30
2. 論文標題 Efficient silicon and side-cladding waveguide modulator with electro-optic polymer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1885-1895
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.447616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiromu Sato, Jiawei Mao, Alisa Bannaron, and Takuro Kamiya, Guo-Wei Lu, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 33
2. 論文標題 A 100 Gbaud On-off-keying Silicon-Polymer Hybrid Modulator Operating at up to 110 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1507-1510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2021.312694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiromu Sato, Alisa Bannaron, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 0-Band Silicon-Organic Hybrid EO Modulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE CPMT	6. 最初と最後の頁 196-199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICJSJ52620.2021.9648900	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jiawei Mao, Alisa Bannaron, Hiromu Sato, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Mode-Confined Ultra Thin Silicon/Polymer Hybrid Electro-Optic Modulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE CPMT	6. 最初と最後の頁 112-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICJSJ52620.2021.9648881	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Alisa Bannaron, Hiromu Sato, Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication of the electro-optic polymer modulator for 0-band intra-datacenter communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE CPMT	6. 最初と最後の頁 192-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICJSJ52620.2021.9648544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Hiromu Sato, Jiawei Mao, Alisa Bannaron	4. 巻 -
2. 論文標題 Highly Reliable Organic Polymer Optical Modulators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Xplore Optical Fiber Communicaions	6. 最初と最後の頁 TH1J.4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OFC.2022.Th1J.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra high speed silicon and polymer hybrid modulator 100 Gbaud transmission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Xplore Optical Interconnect Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IPC47351.2020.9252333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Guo Wei Lu, Jianxun Hong, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Tsubasa Kashino, Juro Oshima, Masa-aki Ozawa, Hideyuki Nawata, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 11
2. 論文標題 High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit/s for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 Jan-24-Jul-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-18005-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 Single 120Gbit/s Operation of Silicon-Polymer Hybrid Modulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Solid State Devices and Materials (SSDM 2020)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra high speed silicon and polymer hybrid modulator 100 G baud transmission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE Photonics Conference (IPC 2020)	6. 最初と最後の頁 MH.3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IPC47351.2020.9252333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Feng Qiu, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Electro-optic Modulators Further than 100 Gbps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CLEO Pacific RIM	6. 最初と最後の頁 Tu3E.3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/CLEOPR.2018.Tu3E.3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Guo-Wei Lu, Member, IEEE, Hong-Bo Zhang, Satoshi Shinada, Member, IEEE, Jianxun Hong, Yongpeng Cheng, and Shiyoshi Yokoyama	4. 巻 27
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSTQE.2021.3056721	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhenghao Yin, Kenta Sugiura, Hideaki Takashima, Ryo Okamoto, Feng Qiu, Shiyoshi Yokoyama, and Shigeki Takeuchi	4. 巻 29
2. 論文標題 Frequency correlated photon generation at telecom band using silicon nitride ring cavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4821-4829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.416165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Heiner Zwickel, Stefan Singer, Clemens Kinnger, Yasar Kutuvantavida, Nark Muradyan, Thorsten Wahlbrink, Shiyoshi Yokoyama, Sebastian Randel, Wolfgang Freude, and Christian Koos	4. 巻 28
2. 論文標題 A verified equivalent-circuit model for slotwaveguide modulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 12951-12976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.383120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokoyama, S; Lu, GW; Cheng, XY; Qiu, F; Spring, AM	4. 巻 -
2. 論文標題 110 Gbit/s On-Off Keying Transmitter Based on a Single-Drive Polymer Modulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Xplore Optical Fiber Communicaions	6. 最初と最後の頁 Tu2H.5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OFC.2019.Tu2H.5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama, S; Lu, GW; Cheng, XY; Qiu, F	4. 巻 -
2. 論文標題 Long-term Stable Electro-optic Polymer for Hybrid Integration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Xplore Optical Fiber Communicaions	6. 最初と最後の頁 M3D.4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OFC.2019.M3D.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hong, JX; Spring, AM; Qiu, F; Yokoyama, S	4. 巻 9
2. 論文標題 A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SCIENTIFIC REPORTS	6. 最初と最後の頁 12988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-49324-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Cheng, XY; Qiu, F; Spring, AM; Sasaki, M; Kashino, T; Ozawa, M; Nawata, H; Kita, T; Sugihara, O; Yokoyama, S	4. 巻 27
2. 論文標題 Camera sensor platform for high speed video data transmission using a wideband electro-optic polymer modulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OPTICS EXPRESS	6. 最初と最後の頁 1877-1883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.001877	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lu, GW; Hong, JX; Zhang, HB; Qiu, F; Yokoyama, S	4. 巻 -
2. 論文標題 DAC-less PAM4 Transmitter using Electro-optic Polymer Dual-drive Mach-Zehnder Modulator with Imbalanced Binary Driving Electronics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO)	6. 最初と最後の頁 STh1N.7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/CLEO_SI.2019.Sth1N.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 "Andrew M. Spring, Feng Qiu, Jianxun Hong, Alisa Bannaron, Xiaoyang Cheng, Shiyoshi Yokoyama"	4. 巻 -
2. 論文標題 Adamantyl and carbazole containing trans-poly(norbornene-dicarboximide)s as electro-optic chromophore hosts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 382-390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2019.04.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件(うち招待講演 19件/うち国際学会 24件)

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 シリコンハイブリッド型ポリマー変調器を用いた超高速データ伝送
3. 学会等名 電子情報通信学会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Highly Reliable Organic Polymer Optical Modulator
3. 学会等名 2022 Optical Fiber Communication Conference (OFC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 100 Gbaud on-off-keying silicon polymer hybrid modulator
3. 学会等名 Photonics West 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yokoyama
2. 発表標題 Efficient 100 Gbaud OOK and PAM4 modulation using hybrid Si and electro-optic polymer modulator
3. 学会等名 ISPEC 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromu Sato, Alisa Bannaron, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 0-band silicon-organic hybrid EO modulator
3. 学会等名 10th IEEE CPMT Symposium Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Alisa Bannaron, Hiromu, Sato, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Fabrication of the electro-optic polymer modulator for O-band intra-datacenter communications
3. 学会等名 10th IEEE CPMT Symposium Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiawei Mao, Alisa Bannaron, Hiromu sato, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Mode-confined ultra thin silicon/polymer hybrid electro-optic modulator
3. 学会等名 10th IEEE CPMT Symposium Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 龍汰、田嶋 凜太郎、横山 士吉
2. 発表標題 Silicon-Polymer Hybridリング共振器の作製と評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryuta Kobayashi, Rintaro Tajima, Rokumyo Kenta, Hiromu Sato, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Fabrication and Optical Properties of Silicon and Polymer Hybrid Ring Resonator
3. 学会等名 KJF-ICOMEF 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromu Sato, Alisa Bannaron, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 High efficient polymer silicon hybrid EO modulator
3. 学会等名 KJF-ICOME P 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenta Rokumyo, Alisa Bannaron, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 The synthesis of nonlinear optical chromophores with short electro-optic wavelength
3. 学会等名 KJF-ICOME P 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiawei Mao, Hiromu Sato, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Efficient electro-optic modulation based on a mode-confined ultra-thin silicon/polymer hybrid modulator
3. 学会等名 KJF-ICOME P 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Alisa Bannaron, Hiromu Sato, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Nonlinear optical push-pull chromophores for the next generation datacenter
3. 学会等名 KJF-ICOME P 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Hiromu Sato, Jawei Mao, Alissa Bannaron, Takuro Kamiya, Feng Qium, and Gue-Wei Lu
2. 発表標題 Overview and Future Challenges on Polymer and Photonics in High-speed Communications
3. 学会等名 KJF-ICOMEF 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 高速EOポリマー変調器の開発と200Gbit/sデータ伝送
3. 学会等名 第2回光集積及びシリコンフォトニクス(PICS)研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu
2. 発表標題 Efficient 120 Gbit/s OOK and 200 Gbit/s PAM4 transmitter using integrated silicon and polymer hybrid modulator
3. 学会等名 International conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Efficient 120 Gbaud transmitter using integrated silicon hybrid polymer modulator
3. 学会等名 International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics (ICNN2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato
2. 発表標題 Ultra high speed silicon and polymer hybrid modulator 100 Gbaud transmission
3. 学会等名 2020 IEEE Optical Interconnect Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato
2. 発表標題 Ultra high speed silicon and polymer hybrid modulator 1-00 G baud transmission
3. 学会等名 IEEE Photonics Conference (IPC 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Guo-Wei Lu, Feng Qiu, and Hiromu Sato
2. 発表標題 Single 120Gbit/s Operation of Silicon-Polymer Hybrid Modulator
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials (SSDM 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 電気光学ポリマーを用いた超高速光変調器
3. 学会等名 光通信技術展 セミナー「最先端光り材料技術の動向と今後の展望」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 ポリマー変調器を用いた高温動作200Gbit/s変調の実現
3. 学会等名 自動車・モビリティフォトニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 E0ポリマー変調器
3. 学会等名 産総研フレキシブルエネルギーデバイスコンソーシアム 第3回講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神谷拓郎、佐藤洸、横山士吉
2. 発表標題 SiLN01ハイブリッド型光変調器の作製と強度変調特性
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Possible integrated Si and E0 polymer modulator for efficient high-speed transmitter
3. 学会等名 2020 Optica Fiber Communication Conference (OFC)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山士吉
2. 発表標題 シリコンハイブリッド型ポリマー変調器を用いた高速送信器
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 Polymer based high-speed optical transmitter beyond 100 Gbit/s for telecommunications
3. 学会等名 The 13th MANA International Symposium 2020(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Alisa Bannaron, Andrew M. Spring, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 High-thermal stable poly(norbornene-dicaboxyimide) for electro-optic polymer modulator
3. 学会等名 Photonics West 2020(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Xiaoyang Cheng, Feng Qiu, Andrew M. Spring, Guo-wei Lu, Ysubasa Kashino, Juro Ooshima, Masaaki Ozawa, and Hideyuki Nawata
2. 発表標題 Efficient 110 Gbit/s OOK transmitter using silicon hybrid polymer modulator
3. 学会等名 45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiyoshi Yokoyama, Gue-Wei Lu, and Feng Qiu
2. 発表標題 110Gbit/s on-off-keying transmitter based on an electro-optic polymer modulator
3. 学会等名 KJF- ICOMEP 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guo-Wei Ly, Jianxun Hong, Hongbo Zhang, Feng Qiu, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 DAC-less PAM4 transmitter using electro-optic polymer dual-drive Mach-Zehnder modulator with imbalanced binary driving electronics
3. 学会等名 CLEO2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiyohi Yokoyama
2. 発表標題 110 Gbit/s On-Off-Keying based on High Temperature Resistant Polymer Modulator
3. 学会等名 ECIO 2019 (24th European Conference on Integrated Optics) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 非線形光学活性コポリマー	発明者 横山士吉、菓子野翼	権利者 九州大学、日産化学株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、2021-177966	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------