

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04153

研究課題名(和文) 擬似位相整合高次非線形アレイ導波路による全光コヒーレントシリアルパラレル信号処理

研究課題名(英文) All-optical coherent serial-parallel signal processing using quasi-phase matched highly nonlinear arrayed waveguides

研究代表者

福地 裕 (FUKUCHI, Yutaka)

東京理科大学・工学部電気工学科・准教授

研究者番号：70366433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： インターネットを支える光通信は、この30年で性能が飛躍的に向上し、今後も高速大容量化が求められています。なぜなら、4K・8K放送やメタバース、動画配信などによって、流通する情報量が爆発的に増えることが明らかだからです。

将来のエクサビット級の光通信システムを構築するには、ブレークスルー(技術的な障壁の突破)が必要です。本研究では理論と実験の両面から、光の情報を光のまま処理する「先端擬似位相整合デバイスを用いた高機能光信号処理技術」の開発を進めており、システム実験では高い性能を実現しています。また企業や海外の大学との共同研究では、実用に耐えうる新世代の光通信システムの構築を目指しています。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来の光ノードに対して、コストや環境負荷の低減と同時に小形軽量化や高性能化を目指している。また光の本質を理解し、その特質を最大限発揮することにより、トレードオフの高速性と高機能性を追求している。ハードウェアからソフトウェアまで、およびデバイスからシステムまでの幅広い技術的波及効果なども期待される。こうした取り組みは、国内外の他の研究開発機関やメーカー等ではなされておらず、独創的で学術的重要性も高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)： Optical communications, which support the Internet, have improved significantly in performance over the past 30 years and will continue to require higher speed and larger capacity. This is because it is clear that the data traffic will explode with 4K/8K broadcasting, metaverse, and video distribution, etc.

Breakthroughs (breaking through technical barriers) are needed to construct exabit/s optical communication systems in the future. We are both theoretically and experimentally developing "high-functional optical signal processing technology employing advanced quasi-phase matched devices" that processes the data signal in by an all-optical method, and have achieved high performance in system experiments. In joint research with companies and overseas universities, we also aim to build a new generation of smart optical communication systems that can hold up to practical use.

研究分野：光通信工学

キーワード：フォトニックネットワーク 超高速情報処理 先端機能デバイス 光スイッチ 先端的通信

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ICT (Information and Communication Technology) 革命により膨大な情報がネットワークに流通するようになり、国内外の社会システムに大きな変革を引き起こしている。1965年に提唱された集積回路の集積度が1年半で2倍になるというムーアの法則に比べて、「光通信のムーアの法則」と呼ばれるものでは、容量・距離積が4年で10倍になるとされている。インターネットで実現される情報空間の巨大性に基づくビッグデータやメタバース、瞬時性、同時性、経済性、仮想現実等は、これまでの物質に基づいて形成されてきた我々の価値観に新たなあり方をもたらしている。グローバルなネットワーク上では、国や大陸といった物理的区別はなくなり、もはや時間的・空間的隔たりも意識することはない。このように、急速かつ高度に多様化し拡大・進化し続ける高度情報化社会を継続して支えていくには、近い将来そのバックボーンを形成する光情報通信ネットワークにエクサ (10^{18}) ビット毎秒 (Ebit/s) 級の超大容量性が要求されると予測されている。

今後は「通信の面としてのより高度な展開」が予想され、将来の社会基盤となる真に高速大容量かつ柔軟な光情報通信ネットワークを構築するには、スマートでコヒーレントなネットワークノードが必須となる。しかしながら大規模集積回路 (LSI) 技術を駆使した「電気ノード」では、光信号を電気信号へ変換後、電気段で処理するため、そのようなネットワークは構成電子回路の動作速度に律速される。本質的に、LSIの速度は回路のキャパシタンスとキャリアの移動度により制限され、従来の半導体技術の高性能化の延長線上で数百ギガ (10^9) ビット毎秒 (Gbit/s) の壁を超えるのはかなり困難である。また信号処理の高度化と大規模化に伴い、LSIの開発製造コストは急激に上昇し、処理速度も低下する。

このように、高機能で超高速に動作し、多種多様で膨大なデータをリアルタイム処理でき、なおかつコヒーレント動作も可能な信号処理回路を如何に提唱・開発していくかが今後の最重要かつ最難関の研究課題の一つと考えられる。

2. 研究の目的

数百 Gbit/s の速度を達成するには、超高速の非線形光学効果を用いた電気を介すことのない全光学的な信号処理による「光ノード」が有効である。これまでに、光ファイバや半導体光増幅器 (SOA) 等の三次非線形効果を用いた、非コヒーレントな光信号処理が実現され、160Gbit/s 以上の動作も実証されている。更に、コヒーレントアンプ等も提案され始めている。しかしながらこれらは、集積度や安定度、応答速度、雑音特性、効率、パターン効果、長時間にわたる安定動作等の点で十分な性能が得られず、実用化の段階には至っていない。更に非線形係数もそれ程大きくなく、実現される非線形過程やその形態に限界があり、デバイスのパラレル化にも大きな課題が残る。

以上を踏まえて、本研究では理論と実験の両面から、異常光導波型および常光・異常光両導波型の各種の擬似位相整合 (QPM) ニオプ酸リチウム (LN) 光導波路における多段高次の非線形光学効果を用いた様々な高度全光コヒーレントシリアル・パラレル信号処理の実現を目標に掲げ、超高速広帯域でスマートな光ネットワークノードを提案する。当該 QPM-LN デバイスの大きな二次非線形性による多段高次の非線形光学効果、高効率超高速性、位相整合のデザインによる高い応用自由度、微細加工技術による低コスト高機能チップの量産可能性等に着目しこれらの特徴を活かす。

3. 研究の方法

これまでの研究実績をベースとして、本研究計画開始前から実施環境や体制の整備を進めていた。例えば、培ったプログラミング技術を活かして、デバイス最適設計時に使う数値解析プログラムの作成と動作確認をおおむね終了していた。また、これまでに整備した光学機器や送受信システム、測定装置等を効率的・効果的に運用し、デバイスの試作や各種実証実験のための基盤環境整備もほぼ完了していた。計画が申請時の想定を超えた場合等にも備えて、連携研究者やこれまでの共同研究機関との間のより強固で緻密な協力支援体制の確立等も推進していた。研究協力者には大学院生が約6名参加し、計算機管理や多数の試し計算とその検証、予備実験等を行うための準備をしていた。

本研究計画では、最初に電子計算機を用いた数値解析により、当該デバイスの詳細な特性を明らかにし、各種光ノードの設計論の確立や最適化設計等を中心に行った。具体的には、結晶・構造パラメータを制御することによる高次非線形効果を用いた各種全光コヒーレント信号処理についての特性解析を行い、デバイスの試作やその後の基礎・応用実験等に備えた。本解析は、異常光導波型と常光・異常光両導波型の両デバイスに対して、シリアルに高機能な信号処理が実現され、更に各種の変調信号に対する複雑で大規模な処理にも対応できるよう、分極反転周期が光伝搬方向に離散的・多段階に変化する場合とチャープや周期・非周期変調等の連続的に変化する場合を想定した。また、1つの結晶中で光導波路をアレイ化し、高度のパラレル処理等についても検討した。

次に、数理解析で得られた最適パラメータを有する QPM-LN 光導波路を準備し、各種の基本特性を測定し、解析設計時の要求仕様・性能を満足していることを確認した。具体的には、所望の非線形光学効果が得られていること、増幅特性、雑音特性、変換効率、波長レンジ、動作可能な入力信号電力、高速・帯域限界等を測定した。本評価実験では、高機能なレーザ光源が必須であり、申請者の研究室で独自開発したビスマスファイバベース波長・パルス幅・繰返し周波数同時可変コム光源を用いた。

以上を踏まえて、各種の信号処理についての動作実験やシステム実験等を行った。ここではこれまでに整備した実験設備を活用し、実証実験やデジタルコヒーレント光通信システム導入時のインパクト等、システム性能を中心に評価した。

得られた解析や実験の結果は、国内における各学会の全国大会や学術講演会、研究会、外国開催の国際会議、招待講演、雑誌論文等で順次報告した。最後に研究期間全体の成果をまとめて、本学ホームページへの掲載、オープンキャンパスや各種セミナー等で広く社会・国民に発信した。また本研究の問題点やその改善法を検討し、産学連携や国際共同研究プロジェクト等への発展可能性についても検討した。

4. 研究成果

QPM-LN 光導波路の結晶やデバイス構造のパラメータを自在に制御することにより、高次の非線形光学効果を実現し、広帯域平坦光周波数コム生成や、各種変調信号の増幅と波長変換、雑音抑圧、高速光スイッチと再生中継、変調フォーマット変換等を提案した。将来のスマートな光ノードに必須となる全ての信号処理機能を同種の素子と同じ設計ポリシーで実現することにより、コストや環境負荷の低減と同時に小形軽量化や高性能・高機能化を目指す試みは、国内外の他の研究機関やメーカー等ではなされておらず、極めて独創的で学術的重要性も高いと考えられる。

また、国内外共にこれまでは一定の分極反転周期で単一の QPM 波長を有する結晶が主な研究対象であった。これらに対して本研究では、複数の QPM 波長を持たせると、多段高次の非線形光学効果が誘起され、高機能化や多機能化の可能性・有用性等が示された。これらを更に発展させ、分極反転周期を結晶内で離散的・連続的に変化させると、QPM 波長、即ち位相整合条件を光の伝搬方向に分布定数的に自在に制御でき、アレイ化の特質も併せることができれば、設計自由度が格段に増し、これまでにないスマートでコヒーレントな光信号処理の実現可能性も示された。

一方、高機能で超高速に動作する信号処理回路は、データセンターや各種センサ応用等、様々な分野においても必要となる。近年の電子回路の高速化は、扱う信号の周波数を従来のマイクロ波帯からミリ波帯へとシフトさせた。本研究を回路の高速化やこれを支える基礎技術の側面から捉えると、扱う周波数をミリ波帯から更に光波帯（赤外）へとシフトさせるものである。また、本質的に光子（エネルギー）を制御する光信号処理は、1 テラ (10^{12}) ビット毎秒 (Tbit/s) 級の超高速動作も実証され、光量子状態制御による量子暗号通信や量子コンピューティング等への応用も期待されている。しかしながら、光子は損失により消滅してしまい、量子相関も乱れるため、電子（電荷）を制御する LSI と比較して、大容量のメモリ機能や高度な信号処理および演算機能等を安定に実現するには不向きであると考えられている。これらに対して我々は、光の本質を理解し、長所と短所を踏まえた上でその特質を最大限発揮することにより、トレードオフの難関課題とされている高速性と高機能性を同時に追求する革新的な回路技術の 1 つに今後も挑戦していく。

図 1 に示すように本研究の最終目標は、各種の QPM-LN 光導波路を用いた様々な全光コヒーレントシリアル・パラレル信号処理により、時間・周波数・位相・空間という互いに直交する軸上で光のまま自在な処理・多元接続を行うことができる新世代の高度光情報通信ネットワークの構築である。ハードウェアからソフトウェアまで、およびデバイスからシステムまでの幅広い技術的波及効果等も期待できる。

将来の光通信システムでは、時間、波長(周波数)、位相、空間という互いに直交する軸上で高度かつ自在な処理・多元接続を行う

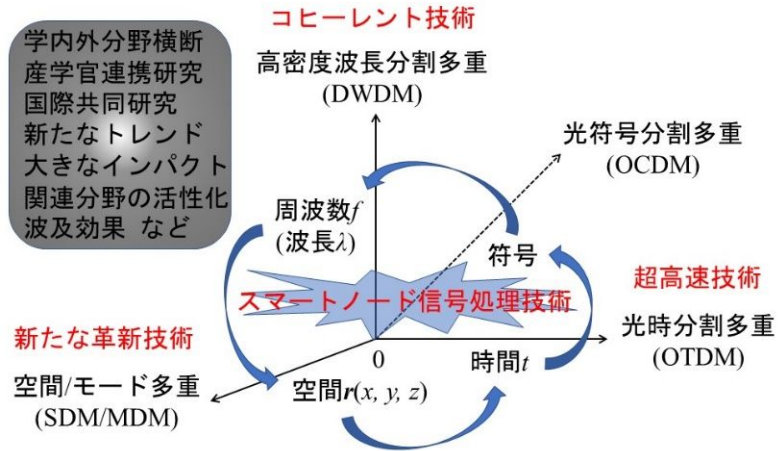


図1. 本研究の最終目標.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takanori Kudo, Tomotaka Kimura, Yutaka Fukuchi, and Kouji Hirata	4. 巻 40
2. 論文標題 Static routing and spectrum allocation method for design of low-power elastic optical networks with multifiber environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Switching and Networking	6. 最初と最後の頁 1-10
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 Ryoichi Miyauchi, Akio Yoshida, Shuya Nakano, Hiroki Tamura, Koichi Tanno, Yutaka Fukuchi, Yukio Kawamura, Yuki Kodama, and Yuichi Sekiya	4. 巻 E104-D
2. 論文標題 The Fractional-N all digital frequency locked loop with robustness for PVT variation and its application for the microcontroller unit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Inf. and Syst.	6. 最初と最後の頁 1146-1153
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 Takanori Kudo, Tomotaka Kimura, Yutaka Fukuchi, and Kouji Hirata	4. 巻 40
2. 論文標題 Static routing and spectrum allocation method for design of low-power elastic optical networks with multifiber environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Switching and Networking	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.osn.2021.100604	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 Yutaka Fukuchi, Kouji Hirata, and Joji Maeda	4. 巻 432
2. 論文標題 Characteristics of selective and tunable wavelength converters using quasi-phase matched lithium niobate waveguide devices with dual pump configuration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 71-78
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 -

[学会発表] 計23件(うち招待講演 7件/うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Optical frequency comb source employing a short bismuth-based nonlinear erbium-doped fiber
3. 学会等名 The 12-th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi and Ryoichi Miyauchi
2. 発表標題 Optical frequency comb generation from a bismuth-based mode-locked fiber laser
3. 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (ACP/IPOC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi, Yusuke Kameda, and Joji Maeda
2. 発表標題 Numerical analyses of all-optical gate switches using quasi-phase matched periodically poled lithium niobate devices: effects on fabrication errors
3. 学会等名 The 12-th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi, Genki Abe, and Kazumasa Kawanaka
2. 発表標題 QPM-LN-based 40GHz to 40GHz switch using cascaded nonlinearities
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe 2021) and European Quantum Electronics Conference (EQEC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Bismuth-based optical frequency comb source
3. 学会等名 International Meet and Expo on Laser, Optics and Photonics (OPTICSMEET 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部 元気, 宮内 亮一, 福地 裕
2. 発表標題 擬似位相整合二オプ酸リチウム光導波路を用いた全光スイッチの特性
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (PN 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi and Ryoichi Miyachi
2. 発表標題 Numerical analyses of all-optical decision gate using cascade QPM-PPLN
3. 学会等名 The 9-th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi and Yusuke Kameda
2. 発表標題 All-optical 40-GHz to 40-GHz switching by cascade second-order nonlinearities in a QPM-PPLN device
3. 学会等名 The 33-th IEEE Photonics Conference (IPC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi and Kouji Hirata
2. 発表標題 Characteristics of a 40-GHz all-optical switch using cascaded nonlinearities in a periodically poled lithium niobate waveguide
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Rational harmonic mode-locking operation of bismuth-based fiber laser source
3. 学会等名 The 10-th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryoichi Miyachi, Akio Yoshida, Shuya Nakano, Hiroki Tamura, Koichi Tanno, Yutaka Fukuchi, Yukio Kawamura, Yuki Kodama, and Yuichi Sekiya
2. 発表標題 Novel Fractional-N all digital frequency locked loop with robustness for PVT variation
3. 学会等名 The 50-th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤 広斗, 福地 裕, 平田 孝志
2. 発表標題 マルチコアファイバネットワークにおけるクロストーク制限下の経路選択及び周波数割当手法
3. 学会等名 電気学会 通信研究会 (CMN 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Frequency comb generation from a bismuth-based mode-locked fiber laser
3. 学会等名 The 8-th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroto Kondo, Tomotaka Kimura, Yutaka Fukuchi, and Kouji Hirata
2. 発表標題 Static routing and spectrum allocation for mitigating crosstalk in multi-core fiber networks
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Characteristics of bismuth-based frequency comb laser
3. 学会等名 The 9-th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi and Ryoichi Miyauchi
2. 発表標題 Optical frequency comb generation from a bismuth-based fiber laser
3. 学会等名 The 24-th MicroOptics Conference (MOC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi, Eizo Uzu, Takahiro Yoshida, and Masaya Fujisawa
2. 発表標題 Numerical analyses of all-optical ultra-fast gate switches employing periodically poled lithium niobate devices: output deterioration and pattern effect by device fabrication errors
3. 学会等名 The 42-nd Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田 真大, 近藤 広斗, 福地 裕, 平田 孝志
2. 発表標題 エラスティック光パスネットワークにおけるコア間クロストークを考慮した静的RMLSA手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム/情報ネットワーク研究会 (NS/IN 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Performance limitation of selective and tunable wavelength converters using QPM LiNbO3 devices with dual pump configuration
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Tunable and selective wavelength converter for 40Gbit/s signals employing cascaded second-order nonlinearity in quasi-phase matched lithium niobate
3. 学会等名 The Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Technique of arbitrary wavelength conversion employing cascade of sum frequency mixing and difference frequency mixing in periodically poled lithium niobate waveguides
3. 学会等名 Energy Materials Nanotechnology Meeting on Photonics (EMN Photonics 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Selective and tunable wavelength converter using periodically poled lithium niobate waveguide with dual pump configuration
3. 学会等名 The 8-th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Fukuchi
2. 発表標題 Technique of selective and tunable wavelength conversion employing quasi-phase matched lithium niobate devices with dual pump configuration
3. 学会等名 The 10-th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics (Optics 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------