

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760347

研究課題名(和文) 擬似位相整合波長分布制御高次非線形光学素子を用いた高機能全光超高速広帯域信号処理

研究課題名(英文) Ultra-fast and extra-broadband all-optical high-functional signal processing using higher order nonlinear effect in aperiodic quasi-phase matching devices

研究代表者

福地 裕 (FUKUCHI, Yutaka)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：70366433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、擬似位相整合波長を分布定数的に制御したニオブ酸リチウム光導波路デバイスの高次非線形光学効果を用いた、超高速かつ超広帯域で動作する様々な高機能全光学的信号処理回路に関する研究を行った。具体的には、電子計算機による特性解析や原理実証実験、システム実験等を行うことにより、当該光信号処理回路の実現可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a possibility of ultra-fast and extra-broadband operation of all-optical high-functional signal processing employing higher order nonlinear effect in aperiodic quasi-phase matching lithium niobate waveguide devices has been shown.

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

1. 研究開始当初の背景

ICT 革命が進行している。ネットワークに流通する情報量は予測不能なほど増え続けており、膨大な情報の流通が、21 世紀初頭の社会システムのあらゆる面で大きな変革を引き起こしている。インターネットで実現される情報空間の巨大性、瞬時性、同時性、経済性等は、これまでの物質に基づいた我々の価値観に、新たなあり方をもたらしている。このように、急速かつ高度に多様化し発展し続ける ICT 社会に対応していくためには、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近い将来ペタビット毎秒(Pbit/s)級の超大容量性が要求される。

このような超大容量の光ネットワークを構築するためには、光段での時分割多重や高密度波長分割多重、光符号分割多重等の様々な多重化技術を単独またはハイブリッドに駆使する必要がある。現在、最も単純な点と点を繋ぐ通信においては、搬送波周波数約 200 テラヘルツで 69.1 テラビット毎秒(Tbit/s)の超大容量伝送実験が報告され、光のもつ超高周波性が通信の大容量化に確実に結びつき始めている。

一方、将来の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、論理回路を駆使した高機能かつ超高速で動作する多種多様なノード信号処理回路が必要である。しかしながら、電子回路で構成された現在の「電気ノード」では、光信号を電気信号に変換した後電気段で処理している。このため、既存のネットワークは電気ノードを構成する電子回路によって律速されているのが現状である。電子回路の動作速度は、本質的には回路のキャパシタンスと半導体中のキャリアの移動度により制限され、装置規模や製造コストの面も考慮すると、現在の半導体ベースの電子回路技術では、数百ギガビット毎秒(Gbit/s)の壁を超えるのは極めて困難である。

数百 Gbit/s 以上の動作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さない全光学的信号処理による「光ノード」が有効であり、電子回路を駆使した電気ノードのようなインテリジェントで様々なタイプの光ノードの実現が今後の最重要課題である。これまでに光ファイバや半導体光増幅器の三次非線形効果を用いた、AND 回路や光波長変換器、時分割アドドロップマルチプレクサ等の全光信号処理回路が提案され、160Gbit/s 以上の超高速動作が実証されているものも少なくない。しかしながら、これらの非線形光学素子は、集積度や安定性、応答速度、雑音特性、効率等の点で十分な性能が得られておらず、実用化の段階には至っていない。更に、可能な信号処理のタイプも限られている。

2. 研究の目的

以上を踏まえた本研究の目的は、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の構築を目指して、擬似位相整合(QPM)ニオブ酸リチウム(LN)光導波路の高次非線形光学効果を用いた光段信号処理の高効率超高速性や高機能性、多機能性に着目し、理論と実験の両面から、様々な全光超高速広帯域信号処理回路を実現することである。将来の光ネットワークノードに必須となる全ての超高速広帯域信号処理回路を、同種の素子を用いて実現することにより、コストや環境負荷の低減と同時に高機能化を図る試みは、国内外の他の研究開発機関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。

最終目標は、これらを用いた時間・波長・位相という互いに直交する軸上で光のまま自在な処理・多元接続を行うインテリジェント光ノードを備えた次世代高度光ネットワークの構築である。デバイス研究からシステム研究への技術的波及効果も期待されると考えられる。

3. 研究の方法

本研究は 4 年計画で、理論と実験の両面から、QPM-LN 光導波路の高次非線形光学効果を用いた様々な全光超高速広帯域信号処理回路を実現し、これらを用いた超高速広帯域でインテリジェントな光ネットワークノードを順次提案していく。

最初に、数値解析用大規模プログラムを用いて、電子計算機による詳細な特性解析を行い、次年度以降のデバイスの試作と各種実証実験に備える。具体的には、それぞれの場合に対して信号処理回路としての性能を最大限発揮するための設計論を確立し、動作帯域や動作速度に応じてデバイス構造パラメータや入力光電力等の最適化を行う。これらの解析結果は、国内学会や外国開催の国際会議等に発表する。

次に、数値解析により得られた最適パラメータを基に、QPM-LN 光導波路を試作し、全光高機能超広帯域波長変換回路を実現する。ここでは、超広帯域動作の実証、光通信システム導入時のインパクト等を評価するためのシステム性能を測定する。具体的には、波長変換効率、波長レンジ、動作可能な入力信号電力、高速限界、入出力信号の符号誤り率特性等を測定する。これらの実験では、申請者の研究室で開発したビスマス系ファイバベース波長・パルス幅・繰返し周波数同時可変パルス光源や、光学機器、光学測定装置、伝送特性評価システム等を使用する。本実験成果は、国内学会や外国開催の国際会議等に発表する。

次に本計画最重要かつ最難関の、同試作デバイスを用いた全光高機能コヒーレント変調フォーマット変換回路を実現する。これらについても、上述と同様の実験を行う。本実験成果は、国内学会や外国開催の国際会議等に発表する。

最後に4年間の研究成果全体をまとめ、雑誌論文に投稿し、成果全体を広く国内外に公表する。また、その概要を研究室ホームページ等に掲載し、更に本学オープンキャンパス等にも出展するなどして、広く社会・国民に発信する。

4. 研究成果

数値解析により、信号スペクトルの端にQPM波長を合わせれば、外部ポンプ光を必要としない全光超広帯域波長変換器が構成可能なことを示し、原理実証実験に成功した。これを基にシステム実験を行い、波長変換帯域50nm以上で高効率の全光超広帯域波長変換器を実現できることを示した。さらにシステム実験では、外部ポンプ光フリーのコヒーレントな全光波長変換器も実現し、デジタルコヒーレント光通信システムへの応用可能性を示した。

この間、デンマーク工科大学光工学科高速光通信グループに客員研究員として出向し、当該研究課題を並行して遂行し、QPM-LN光導波路を用いたコヒーレントな光信号処理機能についての研究を行った。これを基に、理論と実験の両面から、40Gbit/sのQPSK信号から2つのBPSK信号への高効率な波長および変調フォーマットの同時変換にも成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

Yutaka Fukuchi, Kouji Hirata, and Hiroshi Ikeoka, "Extra-broadband wavelength-tunable actively mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-based highly nonlinear erbium-doped fiber," *Optics Communications*, vol. 324, pp. 141–146, August 2014, 査読有, <http://www.journals.elsevier.com/optics-communications/>.

Francesco Da Ros, Kjeld Dalgaard, Yutaka Fukuchi, Jing Xu, Michael Galili, and Christophe Peucheret, "Simultaneous QPSK-to-2×BPSK wavelength and modulation format conversion in PPLN," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 12, pp. 1207–1210, June 2014, 査読有, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

Yutaka Fukuchi, Kouji Hirata, and Hiroshi Ikeoka, "Wavelength-tunable and bandwidth-variable ultra-flat optical frequency comb block generation from a bismuth-based actively mode-locked fiber laser," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, February 2014, 査読有, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

Kouji Hirata, Yutaka Fukuchi, and Masahiro Muraguchi, "Dynamic lightpath

establishment considering four-wave mixing in multifiber WDM networks," *Photonic Network Communications*, vol. 26, no. 2–3, pp. 120–130, December 2013, 査読有, <http://link.springer.com/journal/11107>.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Wavelength-tunable and pulsewidth-variable actively modelocked short-cavity fibre laser using bismuth-based highly nonlinear erbium-doped fibre," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 16, pp. 1012–1013, August 2012, 査読有, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Characteristics of wavelength-tunable harmonically mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-oxide-based erbium-doped fiber and a bismuth-oxide-based highly nonlinear fiber," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 7, pp. 897–902, July 2012, 査読有, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Characteristics of rational harmonic mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-oxide-based erbium-doped fiber and a bismuth-oxide-based highly nonlinear fiber," *Optics Express*, vol. 19, no. 23, pp. 22502–22509, November 2011, 査読有, <https://www.osapublishing.org/oe/home.cfm>.

[学会発表](計27件)

福地 裕, 山本 雅, "周期分極反転二オブ酸リチウム光導波路を用いた全光リタイミングスイッチの特性 ~データ信号とクロック間の時間オフセットの効果~, "電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 518, pp. 41–46, フォトニックネットワーク研究会 (PN 2015), 沖縄県青年会館, 2015年3月18-19日.

平田 孝志, 福地 裕, 村口 正弘, "四光波混合の影響を考慮した省電力全光ネットワーク設計," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 400, pp. 51–56, ネットワークシステム研究会 (NS 2015), 八丈町商工会, 2015年1月22-23日.

Yutaka Fukuchi, Taku Sekine, and Kazuhiro Ohnaka, "Ultra-stable short pulse generation from an actively and harmonically mode-locked fiber laser employing a bismuth-oxide-based nonlinear erbium-doped fiber," *International Topical Meeting on Microwave Photonics / The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP2014)*, Paper TuEA-8, pp. 291–292, Sapporo, Japan, October 20–23, 2014.

C. Peucheret, F. D. Ros, D. Vukovic, Y. Ding, K. Dalgaard, M. Galili, A. Gajda, J. Xu, Y.

Fukuchi, H. Hu, L. Lei, H. Ou, L. Zimmermann, L. K. Oxenløwe, B. Tillack, and K. Petermann, "Parametric phase-sensitive and phase-insensitive all-optical signal processing on multiple nonlinear platforms," *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2014)*, Paper 3A7.1 (Invited), Guangzhou, China, August 25-28, 2014.

南出 大揮, 円田 章宏, 池岡 宏, 福地 裕, "擬似位相整合ニオブ酸リチウムデバイスの縦続二次非線形効果を用いた全光学的リタイミングスイッチの特性解析 ~ デバイス作製誤差の影響 ~," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 167, pp. 11-14, 光通信システム研究会 (OCS), 東京工業大学, 2014年7月31日. 福地 裕, "分極反転ニオブ酸リチウムデバイスを用いた光信号処理," 2014年第61回応用物理学会春季学術講演会, 分科企画シンポジウム(フロンティアを標榜する分極反転デバイス), 18p-F8-5, 青山学院大学, 2014年3月17-20日.

永島 文洋, 福地 裕, "擬似位相整合ニオブ酸リチウム光導波路の縦続二次非線形効果を用いた全光学的超高速再生中継器の特性解析 ~ 信号とクロック間の時間オフセットの効果 ~," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 370, pp. 31-34, 光エレクトロニクス研究会 (OPE 2013), 機械振興会館, 2013年12月20日. Yutaka Fukuchi and Kouji Hirata, "Ultra-flat optical frequency comb block generation from an actively and harmonically mode-locked fiber laser using a bismuth-based erbium-doped fiber and a bismuth-based highly nonlinear fiber," *Nonlinear Optics (NLO 2013)*, Paper NM3A.2, Kohala Coast, Hawaii, USA, July 21-26, 2013.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb and short pulse generation from an actively mode-locked laser using a bismuth-based erbium-doped fiber and a bismuth-based highly nonlinear fiber," *The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2013)*, Paper CF1E.1, San Jose, California, USA, June 9-14, 2013.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Active mode-locked bismuth-based short-cavity fiber ring laser," *The IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2012)*, Paper P14, Noordwijk, The Netherlands, September 11-14, 2012.

Yusuke Osawa, Fumihito Nagashima, and Yutaka Fukuchi, "All-optical retiming switches using the quasi-phase matched cascaded second-order nonlinear effect," *OptoElectronics and Communications*

Conference (OECC 2012), Paper P2-10, pp. 617-618, Busan, Korea, July 2-6, 2012.

Hideaki Ikeda, Yutaro Shimada, and Yutaka Fukuchi, "Actively and harmonically mode-locked bismuth-based short-cavity fiber laser," *OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012)*, Paper P1-39, pp. 385-386, Busan, Korea, July 2-6, 2012.

Yutaka Fukuchi and Joji Maeda, "Characteristics of amplitude-equalized rational harmonic mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-oxide-based erbium-doped fiber and a bismuth-oxide-based highly nonlinear fiber," *Nonlinear Optics (NLO 2011)*, Paper NWE13, Kauai, Hawaii, USA, July 17-22, 2011.

Yutaka Fukuchi and Yusuke Osawa, "Characteristics of all-optical 3R circuits using the cascaded second-order nonlinear effect in quasi-phase-matched lithium niobate devices," *OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2011)*, Paper 7P3_073, pp. 674-675, Kaohsiung, Taiwan, July 4-8, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福地 裕 (FUKUCHI, Yutaka)
東京理科大学・工学部・准教授
研究者番号：70366433