

平成 30 年 4 月 22 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06085

研究課題名(和文)分極反転周期変調ニオブ酸リチウムの高次非線形効果を用いた全光コヒーレント信号処理

研究課題名(英文)All-optical and coherent signal processing employing higher order nonlinear effects in aperiodically poled lithium niobate devices

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、各種の分極反転周期変調ニオブ酸リチウム光導波路デバイスにおける高次の非線形光学効果を用いた、超高速かつ超広帯域で高機能な全光学的コヒーレント信号処理回路に関する研究を行った。具体的には、電子計算機による数値解析や、基礎実験、原理実証実験、システム実験等を通して、理論と実験の両面から、当該全光コヒーレント信号処理応用の実現可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we study ultra-fast, extra-broadband, high-functional, and coherent all-optical signal processing circuits employing the higher order nonlinear effects in aperiodically poled lithium niobate waveguide devices. Through the numerical analyses, fundamental experiments, experimental demonstrations, and the system experiments, we both numerically and experimentally show the possibilities of such all-optical and coherent signal processing applications.

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

インターネットを基軸として拡大ならびに進化し続ける高度情報化社会においては、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ビット毎秒(Ebit/s)級のかつてない超大容量性が要求されるものと予測される。このような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、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た我々の価値観に、新たなあり方をもたらし、社会システム全体にも大きな影響と変革をもたらしている。

超高速大容量の光ネットワークを構築するためには、デジタル領域においてキャリア位相の推定や偏波多重分離が可能なデジタルコヒーレント光通信システムが有効である。本システムにおいて、光の波としての基本的な性質、即ち位相を最大限活用すれば、無線通信システムのように様々な変調方式や高度な多重化技術を駆使することができる。これまでに、単純な点と点を繋ぐ通信に関しては、例えば、搬送波周波数約 200 テラヘルツ(THz)において、1.01 ペタビット毎秒(Pbit/s)という超大容量の伝送実験が報告されており、光の持つ超周波性と波としての性質が通信の大容量化に着実に結びつき始めているといえる。

一方、将来の真に高速大容量かつ柔軟なデジタルコヒーレント光情報通信ネットワークを構築するためには、高機能かつ超高速で動作する多種多様でコヒーレントなノード信号処理回路が必須である。しかしながら、電子回路で構成された「電気ノード」においては、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、電気ノードベースのネットワークは、電気-光-電気変換のところがボトルネックとなり、構成電子回路の動作速度に律速されてしまう。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って制限される。このため、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と考えられる。

数百 Gbit/s 以上の動作速度を達成するためには、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な信号処理による「光ノード」が有効であると考えられる。電子回路を駆使した電気ノードのように、スマートで様々なタイプの光ノードの実現が今後の重要課題の一つである。これまでに、光ファイバや半導体光増幅器等における三次非線形光学効果を用いた、全光ゲートスイッチや光波長変換器、全光時分割アドドロップマルチプレクサ等のインコヒーレントな全光信号処理回路が実現されており、640Gbit/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。さらにコヒーレントアンブや変調フォ

ーマット変換等のコヒーレントな全光信号処理も提案され始めている。しかしながら、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ず、これらは実用化の段階には至っていない。更に、これら従来の非線形光学デバイスでは可能な信号処理のタイプも限られており、スマート化にも限界があるといえる。

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究課題の目的とその全体構想は、次の通りである。本研究では、将来の社会基盤となる真に高速大容量かつ柔軟なデジタルコヒーレント光ネットワークの構築を目指して、各種の分極反転ニオブ酸リチウム光導波路デバイスにおける高次の非線形光学効果を用いた、光段信号処理の高効率性や超高速性、高機能性、多機能性等に着目し、様々な全光信号処理回路を提唱する。

具体的には、理論と実験の両面から、様々な変調信号の一括増幅や雑音抑圧、チャネル変換、チャネル交換、変調フォーマット変換等を提案している。将来のスマートな光ノードに必須となる全ての全光信号処理回路を、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等を図る試みは、国内外の他の研究開発機関ではなされておらず、独創的で学術的重要性も高いと考えられる。

本研究の最終目標としては、当該非線形光学素子を用いることにより、時間・周波数・位相という互いに直交する軸上で、光のまま自在な処理・多元接続を行う新世代の高度光情報通信ネットワークの構築を目指している。デバイス研究からシステム研究、更には応用・関連分野の研究への技術的波及効果等も期待できる。

3. 研究の方法

本研究は3年計画であり、電子計算機を用いた数値解析、基礎実験、原理実証実験、およびシステム実験等を通して、理論と実験の両面から実施することとした。最初に、各種の分極反転ニオブ酸リチウム光導波路デバイスを用いた全光信号処理回路に対する詳細な特性解析を行った。解析結果を踏まえて、次年度以降の基礎実験や実証実験等に備えた。具体的には、全光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や性能指数の提案、動作帯域や動作速度、変調フォーマット等に応じてデバイスの構造パラメータや入力光電力等の最適化を図った。本計算は、高い解析精度を実現するため、周波数軸上で行った。利用した電子計算機と当該オペレーティングシステム等の計算プラットフォームに対して、最適化された大規模数値解析プログラムを作成した。これらを用いて、それぞれの数値計算を効果的かつ効率的に行った。

次に解析結果を踏まえて、最適化された分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスの基本特性を測定し、要求仕様を満足していることを確認した。具体的には、増幅特性や、波長変換特性、雑音特性、波長可変レンジ、動作可能な入力信号電力、必要となるガードバンド、チャンネル内クロストーク、チャンネル間クロストーク、帯域限界、高速限界等を評価した。

最後に、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実験を行った。具体的には、アイダイアグラム分析や符号誤り率分析等を行った。なお、これらの実験では、独自に開発したピスマス系ファイバベースの波長・パルス幅・繰返し周波数同時可変の高機能パルス光源ならびに同ピスマスベースのチューナブル光周波数コム光源等を活用した。

以上の数値解析、基礎実験およびシステム実験によって得られた研究成果は、以下の「5. 主な発表論文等」欄に示すように、国内学会や外国開催の国際会議等に発表し、更に定期的にまとめたものについては雑誌論文にも投稿した。一方、本学オープンキャンパス等にも出展し、広く社会への発信にも努めた。また本研究の総括を行い、問題点とその改善法を含めて検討し、研究を更に発展・進展するべく新たな研究計画を立てているところである。これらを踏まえて、今後も継続して、当該分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスをベースとして、スマートな全光超高速広帯域ノード信号処理回路を備えた、新世代の高度なデジタルコヒーレント光情報通信ネットワークの構築を目指していきたい。

4. 研究成果

(1) 理論研究および数値解析による成果

最初に、分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスにおける第二高調波発生(SHG)と差周波混合(DFM)の縦続二次非線形光学効果を用いた全光超高速リタイミングスイッチの詳細な特性、即ち静的応答特性と動的応答特性の両方を数値解析した。当該デバイス入力端において、光時分割多重(OTDM)信号に再生クロックの前方へ向けて適切な時間オフセットを与えると、スイッチ効率とタイミングジッタの伝達特性を同時かつ大幅に改善できることを示した。実デバイスを想定した数値計算に基づくシミュレーションでは、10mm 長導波路デバイスの場合、ビットレート 200Gbit/s で動作する全光超高速リタイミングスイッチの構成が可能であり、入力 OTDM 信号のピークパワーが 100mW において、1.3%のスイッチ効率が得られることが示された。

次に、分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスにおける高次の非線形光学効果を用いた、全光超高速再生(3R: 等化増幅+リタイミング+識別再生)中継器についての詳細な

特性解析を行った。この結果、当該デバイス入力端において、OTDM 信号に再生クロックの前方への時間オフセットを与えることにより、上述のリタイミングスイッチと同様に波長変換効率を大幅に改善できることを示した。実デバイスを想定した数値計算に基づくシミュレーションでは、10mm 長導波路デバイスの場合、入力再生クロックのピークパワーを 0.8W および入力 OTDM 信号のピークパワーを 4W とすることにより、ビットレート 200Gbit/s の全光 3R 再生中継が可能であることが示された。このとき、時間オフセットを最適化したときの波長変換効率は、約 2dB であった。

最後に、分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスにおける SHG と DFM の縦続二次非線形光学効果を用いた全光ゲートスイッチの特性を、デバイス作製時および運転時に生じる各種誤差のタイプを分類し、これらを考慮した数値解析を行った。この結果、当該デバイスはスイッチとして超高速に動作し得ることが示されたが、スイッチの高効率化の実現や出力信号の波形劣化を防ぐためには、作製誤差の一つであるドメイン反転周期誤差の十分な低減が必要不可欠であることがわかった。

(2) 基礎実験およびシステム実験による成果

最初に、分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスにおける和周波混合(SFM)と DFM の縦続二次非線形光学効果を用いた、任意の信号波長(波長チャンネル)から他の任意の波長(チャンネル)への変調フォーマットフリーでチューナブルかつセレクトティブな光波長変換特性を測定し、実験によりその帯域限界を解明した。この結果、波長変換光にパルス幅広がりを生じないための変換元信号光の臨界のパルス幅は、デバイス長に比例して増大していくことがわかった。また、これらの比は約 0.16ps/mm となり、これを当該任意光波長変換器としての性能指数として用いれば、必要帯域に応じて出力信号の波形劣化を生じることなく波長変換効率を最大化するための最適なデバイスパラメータを求められることを示した。

次に、提案した当該性能指数を用いることにより、実システムへの応用を想定して、いくつかの最適デバイス設計を提案した。例えば、50mm 長導波路デバイスは、40Gbit/s 信号に対して適切な擬位相整合(QPM)帯域幅を持つことから、多重化された波長チャンネルの選択性も兼ね備えているといえる。従って本デバイスは、40Gbit/s で 100GHz 間隔の高密度波長分割多重(DWDM)光通信システムにおけるチャンネル間の光波長変換等に有望であることが示された。その一方で、分極反転二オブ酸リチウム光導波路デバイスを用いた任意光波長変換器を、160Gbit/s の超高速 OTDM 光通信システムに適用するためには、約 2ps 程度の短い光パルスをパルス広がりな

く波長変換する必要がある。この場合、本研究で明らかとなった 0.16ps/mm の性能指数は、高効率性をある程度犠牲にして、 10mm 長導波路デバイスを用いなければならないことを示唆していた。

最後にシステム実証実験として、最適化された 50mm 長導波路デバイスを用いることにより、 40Gbit/s 光信号(DWDM チャネル)に対する変調フォーマットフリーで高効率、チューナブルかつセレクトティブな光波長変換器を実現した。特に、様々な波長帯、波長配置、波長間隔等における信号のアイパターンを詳細に評価し、各動作条件下における波長変換光に対して、良好なアイ開口を得ることに成功した。

(3) 本研究計画で必須の高機能光源の開発

酸化ビスマス系ガラスベースの高調波および有理高調波強制モード同期ファイバリングレーザを新たに設計・製作し、併せてその詳細な出力特性を評価した。本パルスレーザでは、長さが 1.5m の短尺のビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ(Bi-HNL-EDF)を、光共振器内における広帯域利得媒質と安定化のための自己位相変調スペクトル拡散デバイスの両方に用いた。この結果、ファイバリング共振器の全長を約 6m に抑え、スーパーモードの競合による出力光の強度雑音を効果的に抑圧した。また、繰り返し周波数 10GHz の高調波モード同期時、および2次の 20GHz から4次の 40GHz までの有理高調波モード同期時の全てに対して、光通信波長帯であるCバンドおよびLバンドの両方をカバーする広い連続波長可変性を実現した。さらに、共振器内の強制モード同期のためのニオブ酸リチウム光変調器の直流バイアス電圧と正弦波変調振幅を適切に調整することにより、非線形な伝達関数を実現し、4次までの高安定で振幅等化された有理高調波モード同期光パルス列の生成にも成功した。

上記実験と並行して、同 Bi-HNL-EDF と帯域幅可変チューナブル光帯域通過フィルタを用いたファイバリング型光周波数コム発生器を新たに設計・試作し、出力光の中心波長、スペクトル幅およびパルス幅の連続かつ同時可変性やその安定性等を評価した。本光周波数コム光源では、Bi-HNL-EDF の持つ短尺性、広帯域利得特性、および高非線形性という3つの特徴を全て活かした。この結果、ファイバリング共振器の全長を約 14m に抑え、スーパーモードの競合雑音を効果的に抑圧し、中心波長連続可変レンジ 1535nm から 1615nm 、パルス時間幅連続可変レンジ 7.8ps から 23.1ps の全域にわたって、繰り返し周波数 10GHz の高安定なモード同期光パルス列の生成に成功した。さらに、出力光の強度変調時の符号誤り率測定においては、全可変レンジ上においてエラーフローのない良好な符号誤り率特性を得ることに成功し、シス

テムがフリーランの状態でもエラーフリー動作が維持された。

今後の発展課題としては、 40GHz を超えるパルス繰り返し周波数の実現や、偏波保持系の構築や共振器長の安定化により、環境変化に基づく外乱や実用システムに十分に耐え得る程度の長時間にわたる安定動作の実現等が挙げられる。さらに、分散補償技術等を駆使することにより、出力光パルスの波形整形や、サブピコ秒級の超短パルス幅の実現等も考えられる。また、同 Bi-HNL-EDF を用いることによるスーパーコンティニューム光の生成や、超平坦かつ超広帯域のオクターブ光の生成等にも挑戦したい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Yutaka Fukuchi, Tomotaka Kimura, and Kouji Hirata, “Characteristics of all-optical 3R regenerators using cascaded second-order nonlinear effect in quasi-phase matched lithium niobate devices,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 9, article 297, 16 ページ, September 2017, 査読有.

Yutaka Fukuchi, Kouji Hirata, Masahiro Muraguchi, and Joji Maeda, “Rational harmonic mode-locked laser using a bismuth-oxide-based highly nonlinear erbium-doped fiber,” *Optics Communications*, vol. 383, pp. 397–401, January 2017, 査読有.

Kouji Hirata, Kohei Ito, Yutaka Fukuchi, and Masahiro Muraguchi, “Design of low power all-optical networks with dynamic lightpath establishment,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 551–558, August 2016, 査読有.

Yutaka Fukuchi, Kouji Hirata, and Joji Maeda, “Numerical analyses of all-optical retiming switches using cascade of second harmonic generation and difference frequency mixing in periodically poled lithium niobate waveguides,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E98-C, no. 12, pp. 1143–1149, December 2015, 査読有.

[学会発表](計26件)

Yutaka Fukuchi, “Technique of generating flat frequency combs and short pulses from a harmonically mode-locked bismuth-based fiber ring laser,” *The 7-th International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNET 2017)*, Paper CNT2117 (Invited), pp. 17–18, Hualien, Taiwan, November 24–27, 2017.

Yutaka Fukuchi, Tomotaka Kimura, and Taichi Matsuura, “Pattern effects of random domain length error in PPLN-based all-optical retiming switches,” *The 22-nd MicroOptics Conference (MOC 2017)*,

Paper P-74, Tokyo, Japan, November 19-22, 2017.

Yutaka Fukuchi, “Technique of optical frequency comb generation from a bismuth-based harmonically mode-locked fiber laser,” *The 8-th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics (Optics 2017)*, p. 103 (Invited), Las Vegas, Nevada, USA, November 15-17, 2017.

福地 裕, “周期分極反転ニオブ酸リチウム光導波路におけるカスケード二次非線形効果を用いたチューナブル波長変換器の特性,” 2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会, 6a-A402-5, 福岡国際会議場, 2017年9月5-8日.

Yutaka Fukuchi and Taichi Matsuura, “All-optical switch using cascaded second-order nonlinear effect in PPLN: pattern effect of period error,” *The Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, the OptoElectronics and Communications Conference, and the Photonics Global Conference (CLEO-PR/OECC/PGC 2017)*, Paper P1-078, Singapore, July 31-August 4, 2017.

Yutaka Fukuchi, “Flat frequency comb and short pulse generation from a bismuth-based actively mode-locked fiber laser,” *Energy Materials Nanotechnology Meeting on Optoelectronics (EMN Optoelectronics 2017)*, Paper C07 (Invited), pp. 29-30, Victoria, Canada, April 17-21, 2017.

福地 裕, 木村 共孝, 吉田 孝博, “擬似位相整合ニオブ酸リチウム光導波路デバイスにおける縦続二次非線形光学効果を用いた40Gbps-NRZ光信号の高効率チューナブル波長変換,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 498, pp. 7-10, フォトニックネットワーク研究会 (PN 2017), 大濱信泉記念館, 2017年3月6-7日.

福地 裕, “酸化ビスマス系ガラスベース高非線形エルビウム添加ファイバを用いた波長可変およびパルス幅可変高調波モード同期ファイバリングレーザ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 294, pp. 5-8, 光通信システム/光ファイバ応用技術/放送技術/通信研究会 (OCS/OFT/ITE-BCT/IEE-CMN 2016), 長崎商工会議所, 2016年11月10-11日.

Yutaka Fukuchi, “Highly efficient and tunable all-optical wavelength conversion of 40-Gbps NRZ signals employing a quasi-phase matched lithium niobate waveguide device,” *The 29-th IEEE Photonics Conference (IPC 2016)*, Paper WE2.3, pp. 585-586, Waikoloa, Hawaii, USA, October 2-6, 2016.

Yutaka Fukuchi, “Tunable wavelength converter using cascade of sum frequency mixing and difference frequency mixing in quasi-phase matched lithium niobate,” *The 29-th IEEE Photonics Conference (IPC 2016)*, Paper WE2.2, pp. 583-584, Waikoloa, Hawaii, USA, October 2-6, 2016.

福地 裕, 前田 譲治, “ピスマスペース有理高調波モード同期ファイバレーザ,” 電子情報通信学会 2016年総合大会, C-4-13, 九州大学, 2016年3月15-18日.

福地 裕, 山本 雅, 円田 章宏, “周期分極反転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超高速ゲートスイッチの数値解析 ~ 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. 115, no. 358, pp. 5-10, 光エレクトロニクス研究会 (OPE 2015), しいのき迎賓館, 2015年12月10-11日.

Yutaka Fukuchi and Masaru Yamamoto, “Numerical analyses of all-optical retiming switches using quasi-phase matched lithium niobate waveguide devices: output deterioration by domain length error,” *The Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015)*, Paper 26P-26, Busan, Korea, August 24-28, 2015.

Yutaka Fukuchi and Akihiro Enda, “Stable and amplitude-equalized rational harmonic mode-locked short-cavity fiber laser using a bismuth-oxide-based highly nonlinear erbium-doped fiber,” *The Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015)*, Paper 26P-18, Busan, Korea, August 24-28, 2015.

Yutaka Fukuchi and Masaru Yamamoto, “Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation from a harmonically mode-locked laser using a bismuth-based highly nonlinear erbium-doped fiber,” *Nonlinear Optics (NLO 2015)*, Paper NM1A.3, Kauai, Hawaii, USA, July 26-31, 2015.

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

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者

前田 譲治 (MAEDA, Joji)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 10256670

平田 孝志 (HIRATA, Kouji)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 10510472