

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32644

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889052

研究課題名(和文) PPLN導波路を用いた低雑音位相感応増幅の研究

研究課題名(英文) Study on phase sensitive amplifier using PPLN waveguides

研究代表者

遊部 雅生 (Asobe, Masaki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：60522000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：光通信信号を低雑音に増幅するための位相感応増幅器(PSA)の検討を行った。多値変調信号から搬送波位相を抽出する効率を検討した。搬送波抽出用素子の工夫により効率が従来よりも10dB以上向上することを明らかにした。PSAを安定に動作させるための位相同期回路(PLL)の見直しを行い、安定した位相同期が得られ、かつPLLによる信号品質の劣化が抑えられることを実証した。さらに2つのPPLN導波路を偏波を直交させて用いることにより、偏波多重された信号のPSAを実証した。またPSAの分散耐性を実験的に評価し、信号帯域内の位相変化が一定値以下では、PSAの効果によって信号品質が改善することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We studied phase sensitive amplifier (PSA) which allows us to amplify optical signal with low noise quality. The efficiency of the carrier phase recovery was improved more than 10 dB by improving the design of optical device. We proved that stable phase locking and negligible degradation of signal quality is possible by modification of phase locked loop circuit. We also demonstrated amplification of polarization multiplexed signal by using two PPLN waveguide in polarization diversity configuration. We examined dispersion tolerance of the PSA experimentally and we found that signal quality can be recovered by amplification in PSA if the phase variation within a signal bandwidth is below  $\pi/2$ .

研究分野：光通信

キーワード：位相感応増幅 光増幅器 周期分極反転 擬似位相整合 ニオブ酸リチウム

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光通信の分野では大容量化を目指して周波数利用効率の向上が追求されている。しかし情報量の増大に伴って、“非線形シャノン限界”による伝送容量の限界が指摘されている。これは光ファイバの非線形効果と光増幅器の発生する自然放出光との相互作用により、光ファイバ入力パワーを増大させると、むしろ S/N 比が劣化するというものである。シャノンの通信理論によれば高い周波数利用効率を得るためには高い信号雑音比 (S/N 比) を得ることが必須の条件であるため、この課題を解決するためには光パワーを増大させずに光信号の雑音を低減するか、または高い入力光パワーの条件下での雑音を軽減する技術を研究開発する必要がある。これらの課題を克服しうる技術として位相感応増幅器 (PSA) が注目されている。PSA では理論的には入出力の S/N 比を劣化させない増幅が可能であり、さらに入力光の位相によって利得が変化する性質を利用して位相雑音を低減することも可能である

### 2. 研究の目的

PSA の構成としては 3 次の非線形光学媒質である高非線形性ファイバを用いる方法が一般的であるが、2 次の非線形媒質である周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub> (PPLN) 導波路を用いることで短い媒質長で利得が得られ、3 次非線形性が小さいため波形の劣化が少ない増幅を実現できるなどの潜在的に大きな可能性が期待できる。しかしながら PPLN を用いた PSA にはいくつかの課題がある。

まず、これまでの研究では 2 値の位相変調に信号フォーマットが限られており、多値変調フォーマットに対応可能な構成を実現する必要がある。さらに PSA を光ファイバ伝送網の中継増幅器として用いるためには、変調のかかった入力信号光から搬送波の位相を抽出し、搬送波の位相に同期した励起光を発生し、さらに信号光と励起光の位相同期を行う必要がある。本研究では上記のような課題を解決し、将来の大容量通信に必要な多値変調信号に対応でき、十分な S/N 比を確保できる低雑音光増幅器の可能性を明らかにすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

多値変調信号に対応する低雑音位相感応型光増幅器の実現に向けて次の 3 つの課題に取り組んだ。

(1) 多値変調信号へ対応可能な増幅器の構成法の明確化、搬送波位相抽出方法、位相抽出感度向上

マルチ QPM 素子を用いた搬送波位相抽出と構造最適化による抽出感度の向上を図り、さらに位相共役光発生と非縮退パラメトリック増幅により多値変調信号に対応する構成を検討した。

(2) 多値信号に対する増幅特性、分散耐力の

明確化

PSA の利得の位相依存性、利得飽和効果を利用した位相・強度・雑音低減特性を明らかにするとともに伝送路の持つ群速度分散の増幅特性への影響を調べた。

(3) 中継増幅器として用いた場合の伝送特性に与える改善効果の評価

実際の変調信号の増幅実験を通じて本研究による信号品質改善効果を調べた。

### 4. 研究成果

(1) 多値変調信号に対応可能な位相感応増幅器 (PSA) を実現するために、複数波長において擬似位相整合条件を満たすマルチ QPM 構造を有する PPLN を用いて、多段の周波数混合を行うことにより、4 値位相変調 (QPSK) 信号から搬送波位相に同期した信号を抽出する方法を提案し、その原理確認に成功した。100GHz ごとに 3 つの擬似位相整合ピークを有する PPLN 導波路を作製し、QPSK 信号と局発光を入射すると、2 つの光の周波数混合が多段に生じることにより複数のアイドラ光が発生し、信号位相を 4 倍したアイドラ光を発生することが可能になった。このことにより QPSK 信号の変調を相殺して信号の搬送波位相に同期した信号を得ることに成功した。上記のアイドラ光を半導体レーザに注入同期することにより、信号波位相に同期した 2 つの局発光を発生し、両者の和周波発生により信号の搬送波位相に同期した励起光を発生した。この励起光を用いて上記の多段の周波数混合により発生した位相共役光と入力信号光の非縮退パラメトリック増幅を行うことにより、PPLN を用いた PSA として初めて QPSK 信号の増幅を実現した。さらに上記の PSA の構成では信号位相の変化に対して  $\pi/2$  ごとに利得のピークが得られるために、この特性を利用して QPSK 信号の位相雑音の低減が可能であることを明らかにした。さらに非縮退パラメトリック増幅の際に入射する信号パワーを増大されることにより、利得飽和が生じるため、この効果を利用して強度雑音の低減が可能であることも明らかにした。これらの成果は CLEO-PR & OECC/PS のポストデッドラインセッション、および応用物理学会で発表した。

(2) 上記の非縮退パラメトリック増幅構成をより発展させることにより、当初計画よりもさらに多値度の高い 16QAM 信号の増幅を初めて実証することに成功した。この結果、従来技術である高非線形光ファイバを用いた構成にくらべると 3 次の非線形効果による波形劣化や、副次的な意図しない波長変換による信号パワーの散逸がないために、高い線形性を保ちながらより多値度の高い信号の増幅にも適用可能であることを示すことに成功した。また増幅前に受けた位相雑音などを低減することによって増幅時に信号品質

の改善効果が得られることも明らかにした。この結果は ECOC のポストデッドラインセッション、および電子情報通信学会で発表した。また QPSK 信号に対する動作を Optics Express に投稿・掲載された。

(3) マルチ QPM 構造を有する PPLN を用いて 4 値位相変調(QPSK)信号から搬送波位相に同期した信号を抽出する方法について、さらなる検討を進めた。具体的にはマルチ QPM 素子を用いて複数回行う SHG/DFG の周波数混合のそれぞれの過程の効率を理論式を整理した。その結果 4 逓倍情報を得るにはマルチ QPM 素子のピーク数は 2 つで十分であり、搬送波抽出と位相共役光発生効率の効率がマルチ QPM 素子の効率の 6 乗に比例することが分った。この知見を活かしマルチ QPM 素子のピーク数を減らすことで信号の 4 逓倍による搬送波の抽出だけでなく、非縮退パラメトリック増幅の利用に必要な位相共役光の発生効率が従来よりも 10dB 以上向上することを明らかにした。以上の検討結果をレーザー学会学術講演会で発表した。

(4) PSA を安定に動作させるための位相同期ループ(PLL)について詳細な検討を行った。PLL の回路構成とフィードバック利得の見直しを行った結果、位相変調の振幅を従来よりも 1 ケタ以上小さくしても適切なフィードバック利得を設定することにより安定した位相同期が得られることを実証し、また PLL 中の位相変調に伴う増幅光への過剰な変調成分の残留による信号品質の劣化を抑えられることを実証した。これらの結果を応用物理学学会学術講演会で発表した。

(5) 偏波多重信号に対応する PSA の構成についても検討を行った。構成案として 2 つの偏波成分に分けた信号を 1 つの PPLN 導波路に逆方向にループ状に伝搬させる構成が考えられる。しかし PPLN 導波路からの反射成分が増幅特性へ与える影響があり、PSA への適用は困難だった。そこで、2 つの PPLN 導波路を偏波を直交させてタンデムに接続し、それぞれ直交する 2 つの偏波用の PPLN でパラメトリック増幅を行い、2 つの PLL を独立して両偏波の信号・励起光の位相同期にそれぞれ用いることにより、偏波多重された信号の位相感応増幅を達成した。この結果は ECOC2014 および電子情報通信学会で発表した。

(6) PSA の分散耐性に関しては実験の簡単のため 2 値の位相変調信号に対する分散耐力の検討を行った。群速度分散により波長に対して平坦ではない位相変化を受けた信号を PSA で増幅した場合、PSA の位相感応特性により、波長ごとに受ける利得が異なる。ランダムなベースバンド信号で変調された信号はビットレート程度の周波数広がりを持

った側波帯を有しているが、この側波帯の主要部分において著しい位相変化があると PSA の利得変化によって信号のスペクトルの一部が変形を受け、信号品質が劣化してしまうことが分った。また PSA の分散耐性を実験的に評価した結果、側波帯帯域内の位相変化が  $\pi/2$  以上となる場合、利得変化により信号品質の劣化が確認された。一方、位相変化が  $\pi/2$  以下の場合、信号の分散による位相変化が PSA の効果によってキャンセルされ、分散による位相変化を修正して中継増幅できることが明らかになった。この知見は PSA を用いた中継系の設計を行ううえで重要な知見である。これらの成果については ALPS2014 で発表し、さらに、Journal of Optical Society of America B に投稿・掲載された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

M.Asobe, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga and H. Takenouchi  
“Phase squeezing and dispersion tolerance of phase sensitive amplifier using PPLN waveguide” J. Optical Society of America B Vol. 31, 2014, pp. 3164-3169

<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.31.003164>

M.Asobe, T. Umeki, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto

“In-line phase-sensitive amplification of QPSK signal using multiple quasi-phase matched LiNbO3 waveguide” Optics Express Vol. 22, 2014, pp. 26642-26650

<http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.026642>

T.Umeki, O. Tadanaga, M.Asobe, Y.Miyamoto, and H.Takenouchi

“First demonstration of high-order QAM signal amplification in PPLN-based phase sensitive amplifier” Opt. Express Vol.22, 2014, pp.2473-2482

<http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.002473>

[学会発表](計 13 件)

梅木 毅伺, 風間 拓志, 忠永 修, 圓佛 晃次, 遊部 雅生, 宮本 裕, 竹ノ内 弘和  
“PPLN 導波路を用いた偏波多重信号の位相感応光増幅” 2015 年電子情報通信学会 総合大会, 2015 年 3 月 13 日, 立命館大学(滋賀県 草津市)

中村 一貴, 入野 辰夫, 藤澤 涼平, 曾我 俊太, 遊部 雅生, 梅木 毅伺, 竹ノ内 弘和  
“EO 効果による位相変調を用いた光 PLL における信号品質の検討” 2015 年春季応用物理学術講演会, 2015 年 3 月 11 日, 東海大学(神奈川県 平塚市)

竹ノ内 弘和, 梅木 毅伺, 忠永修, 宮本裕, 遊部 雅生 “究極の低雑音化に挑む位相感応増幅器の最新動向” 2015 年レ

ーザ学会学術講演会, 2015年1月12日, 東海大学(東京都 港区)  
遊部 雅生, 梅木 毅伺, 忠永 修, 竹ノ内 弘和 “QPSK信号の位相感応増幅のための搬送波位相抽出” 2015年レーザー学会学術講演会, 2015年1月12日, 東海大学(東京都 港区)  
T. Umeki, T. Kazama, O. Tadanaga, K. Enbutsu, M. Asobe, Y. Miyamoto, and H. Takenouchi, “First Demonstration of PDM Signal Amplification using PPLN based Polarization-Independent Phase Sensitive Amplifier” ECOC 2014, 2014年9月22日, Palais des Festivals et des Congrès (カンヌ フランス)  
T. Umeki, M. Asobe, O. Tadanaga, H. Takara, Y. Miyamoto, and H. Takenouchi “Phase sensitive amplifiers based on PPLN waveguides for optical communication” COIN 2014, 2014年8月28日, Hyatt Regency (済州島 韓国)  
H. Takenouchi, T. Umeki, O. Tadanaga, K. Enbutsu, Y. Miyamoto and M. Asobe “PPLN-based phase sensitive amplifiers and their applications”, IEEE Nonlinear Optical Signal Processing, 2014年7月14日, Delta Montreal (モントリオール カナダ)  
M. Asobe, T. Umeki, and H. Takenouchi “Dispersion tolerance of phase sensitive amplifier using PPLN waveguide” The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'14), 2014年4月23日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)  
梅木 毅伺, 忠永 修, 遊部 雅生, 宮本 裕, 竹ノ内 弘和, “PPLN導波路を用いたQAM信号の位相感応増幅” 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014年3月21日, 新潟大学(新潟県 新潟市)  
遊部 雅生, 梅木毅伺, 竹ノ内 弘和  
“マルチQPM-LiNbO3導波路を用いたQPSK信号のインライン位相感応増幅” 2014年春期応用物理学会 2014年3月18日 青山学院大学 (神奈川県 相模原市)  
T. Umeki, M. Asobe, H. Takara, O. Tadanaga, K. Enbutsu, Y. Miyamoto, and H. Takenouchi “Low noise and regenerative phase sensitive amplifier based on PPLN waveguides ” OFC/NFOEC 2014, 2014年3月10日, Moscone center (サンフランシスコ アメリカ合衆国)  
梅木 毅伺, 遊部 雅生, 忠永 修, 高良 秀彦, 宮本 裕, 竹ノ内 弘和  
“PPLN導波路を用いた位相感応光増幅技術とその進展” 2014年レーザー学会学術講演会, 2014年1月21日, 北九州国際会議場(福岡県 北九州市)  
T. Umeki, O. Tadanaga, M. Asobe, Y.

Miyamaoto, and H. Takenouchi “First demonstration of QAM signal amplification in PPLN-based phase sensitive amplifier” ECOC 2013 Post deadline PD1.C.5, 2013年9月22日, ICC (ロンドン イギリス)  
〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
産経新聞社賞 平成26年7月31日  
<http://www.fbi-award.jp/sentan/jusyou/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遊部 雅生 (ASOBE, Masaki)  
東海大学・工学部・教授  
研究者番号:

### (2) 研究協力者

竹ノ内 弘和 (TAKENOUCHI, Hirokazu)  
NTT 先端集積デバイス研究所