

産経新聞社賞

PPLN 導波路を用いた位相感応型光増幅技術の
研究開発

～究極の低雑音光増幅器を目指して～

- 1：日本電信電話株式会社 フォトニクス研究所
2：日本電信電話株式会社 イノベイティブフォトニックネットワークセンタ
3：東海大学工学部 電気電子工学科

梅木 毅伺^{1,2} 遊部 雅生³ 忠永 修¹
宮本 裕² 竹ノ内 弘和^{1,2}

近年、デジタルコヒーレント光通信技術が飛躍的に進歩し、光信号の多値化が進展したことで、光通信システムの信号対雑音比を抜本的に改善する必要性が急速に高まってきている。我々は、従来の光増幅器の原理的限界を超える低雑音光増幅と信号品質の再生機能を併せ持つ位相感応光増幅器(PSA)に着目し、光通信用増幅器としての実用性向上に向けて、励起光に対する高い光損傷耐性と高効率性を両立した増幅媒質を開発し、世界で初めて位相感応光増幅器による多中継増幅の実証、マルチキャリア・多値信号の増幅に成功した。本技術によってデジタルコヒーレント光通信技術の持つポテンシャルを最大限に引き出し、将来の光伝送システムのさらなる大容量化が期待できる。

1. 緒言

光通信システムは経済活動や生活の基盤となる通信インフラとして重要な役割を担ってきた。インターネット人口の爆発的な増加をはじめ、スマートフォンの急速な普及や映像配信に見られるコンテンツの大容量化など、新たなネットワークサービスやアプリケーションの登場により通信容量は増加の一途を辿っている。図1に基幹系光伝送システムの大容量化の進展を示す。これまで様々な技術革新によって30年で5桁以上もの容量拡大が実現されてきた。光通信システムに大きな変革をもたらしたエルビウム添加光ファイバ光増幅器(EDFA)の出現により、1990年代後半に入り波長多重(WDM)技術が急速に進展し、ファイバ1芯で1Tbit/s容量を持つ大容量基幹光ネットワークが実用化された。さらに近年では、光通信に超高速デジタル信号処理を積極的に取り入れ、光信号の振幅情報だけではなく位相情報も利用することで多値光信号を安定に変復調できるデジタルコヒーレント方式が提案され、周波数利用効率が一段と向上し、単一コアのファイバで100Tbit/s以上の大容量伝送実験が報告されるまでに至った。

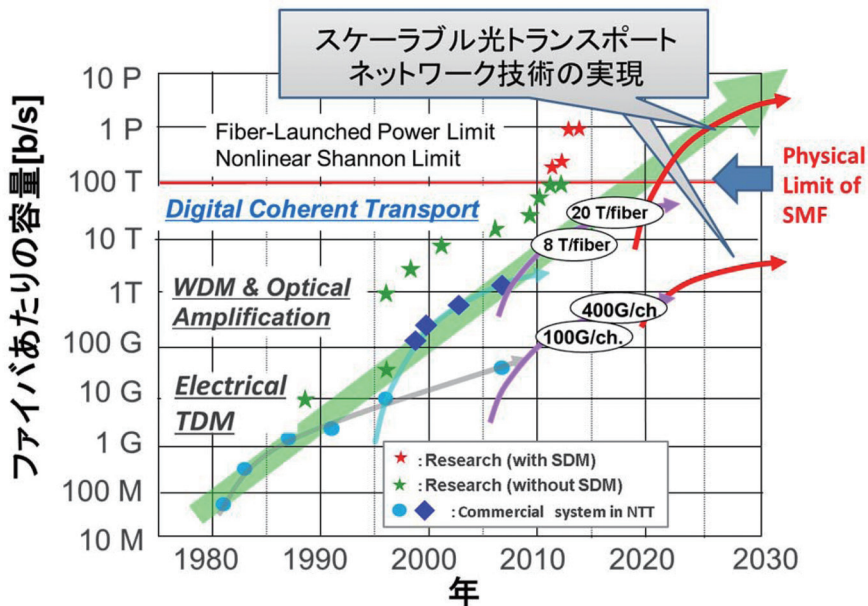


図1：基幹系伝送システムの大容量化の進展

さらなるシステムの大容量化に向けては一層の周波数利用効率の向上が必要であるが、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 SN 比が必須の条件となる [1]。しかしながら、近年光ファイバの非線形光学効果と光増幅器の雑音による SN 比の限界が指摘されはじめている [2,3]。光増幅器を中継器として用いた光伝送システムにおいては、中継器からの雑音の累積と伝送ファイバ中で生じる非線形光学効果に起因した符号間干渉による SN 比の劣化が、伝送距離を制限する主要因となっている。特に近年のデジタルコヒーレント方式に伴う光信号の多値化により、信号点間の距離が確保出来なくなるため、SN 比に対する要求が急激に厳しくなっている。このため、光通信システムの SN 比を抜本的に改善するには光増幅器の雑音低減と非線形雑音を抑制する新たな技術革新が必要である。

EDFA を含めこれまでに実用化された全ての光増幅器は、完全に理想的な場合においても原理的に入力信号の SN 比を半分に劣化させてしまう。これは光増幅における標準量子限界と呼ばれている。これまでの継続的な技術改良により EDFA の特性はこの量子限界に近づいてきている。このため、全く新しい原理に基づく光増幅技術の開発なしにはさらなる雑音低減を図ることができない。

そこで我々は超低雑音光増幅器の実現を目指して位相感応光増幅器 (PSA) の研究を進めてきた。PSA はコヒーレント増幅器とも呼ばれ、理想的には入出力で SN 比劣化の無い光増幅が可能である [4]。さらに PSA は従来の増幅器にはない信号品質の再生効果を併せ持ち、光増幅器自体の低雑音性に加え、伝送により発生した非線形雑音を低減できる可能性を有するため、システム全体として大幅な SN 比の改善が期待できる。我々はこの様な PSA の潜在能力を活かすため実用性の向上に取り組んだ。

具体的には、極めて効率の高い周期分極反転 LiNbO_3 (PPLN) 導波路を用いて PSA を構成し、従来の増幅器の標準量子限界を超える低雑音増幅が可能であることを実証した。また PSA を用いた多中継伝送実験を行い、PSA の信号品質再生効果を利用することで伝送距離の大幅な延伸を確認した。さらに周波数利用効率の向上が期待できるデジタルコヒーレント方式との親和性の高い PSA の実現に向け、マルチキャリア信号の一括増幅や多値変調フォーマット信号の増幅にも取り組み、PPLN 導波路を用いた PSA の光通信用増幅器としての有効性を確認した。

2. 高効率 PPLN 導波路を用いた PSA の実現と低雑音増幅実証

PSA は光の位相に応じた利得を与える増幅器であり、非線形光学効果を用いた光パラメトリック増幅 (OPA) による励起光からのエネルギー移行により実現される。図2に PSA における利得と信号光・励起光間位相差の特性を示す。PSA は光信号の2つの直交する位相に対して一方には利得を与え、他方には減衰を与える特性を有する。

この光位相に依存した増幅特性が従来の光増幅とは全く異なる点であり、この特性により不確定性原理に起因した従来の光増幅器においては不可避である過剰な量子雑音の混入を防ぐことが可能となり (図3(機能①))、従来の光増幅器に課せられる標準量子限界 (NF : 3dB) を打破できるため、理論的には SN 劣化の全くない無雑音光増幅を実現することができる。この超低雑音性に加え、直交位相成分の圧縮 (スキューピング効果) によりファイバ伝送中に生じた非線形雑音を大幅に低減できる可能性がある (図3(機能②))。さらに、光パラメトリック

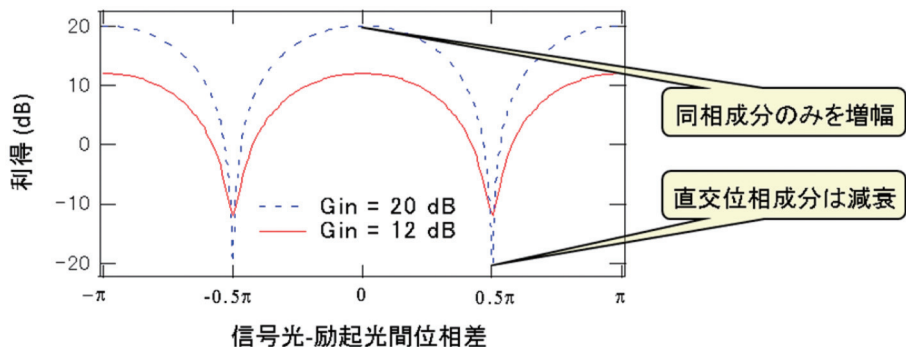


図2：位相感応光増幅器 (PSA) における利得と信号光位相・励起光位相の差の関係

ク増幅過程は、入力光信号の変調速度よりも高速に応答できるため、利得の飽和領域で動作させることで強度変動も同時に抑制可能である(図3(機能③))。

PSA において高利得を実現するためには、増幅に用いる非線形媒質が高い変換効率と高い励起光パワーに対する耐性を同時に有する必要がある。PPLN を光導波路化し微小なコア領域に光を閉じ込めることでバルク結晶では得ることのできない高い効率を達成することができる。しかしながら、従来の PPLN 導波路は Ti やプロトンなどの不純物を結晶内に拡散させることで導波路構造を形成していたため、光損傷による特性劣化から高い励起光パワー入力が難しく PSA 実現の大きな障害となっていた。

我々は LiNbO₃ 結晶自体の損傷耐性の向上を図るとともに、異種基板上へ PPLN を直接接合することで結晶の持つ耐性を損なうことのない新規の導波路構造作製技術を開発してきた[5]。さらに、LiNbO₃ 結晶の加工には適用が困難であるとされてきたドライエッチング技術の開発により、微細導波路の高精度加工を実現することで、高い光損傷耐性と高い波長変換効率の両立に成功した[6]。これにより、はじめて光通信への応用が可能な PSA を構成することが可能となった[7]。

図4(a)に PPLN 導波路を用いた PSA の構成を示す。EDFA で増幅した 1.5 μm 帯の連続光 (CW 光) を局発光とし、PPLN 導波路に入射することで、第二高調波発生により 0.78 μm 帯の励起光を得る。発生した励起光と信号光をもう一方の PPLN 導波路に入射し位相感応光増幅を行う。波長の大きく異なる励起光・信号光を簡便かつ安定的に入出力するために PPLN 導波路はモジュール内に実装している。さらに、2つの光の位相はフィードバック機構 (PLL) を用いて同期している。図4(b)及び(c)に直接接合 PPLN 導波路の断面 SEM 画像

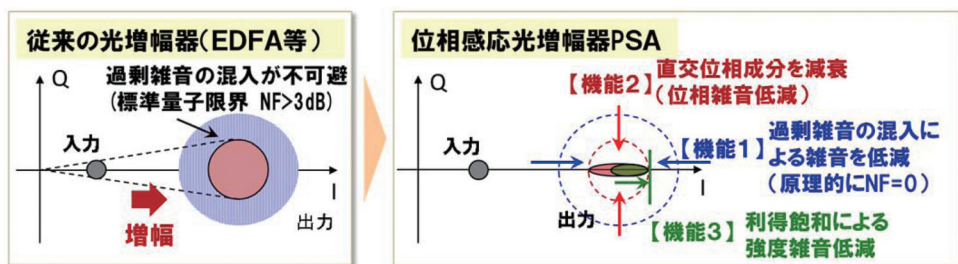


図3：増幅光の電界をベクトル表示した概念図

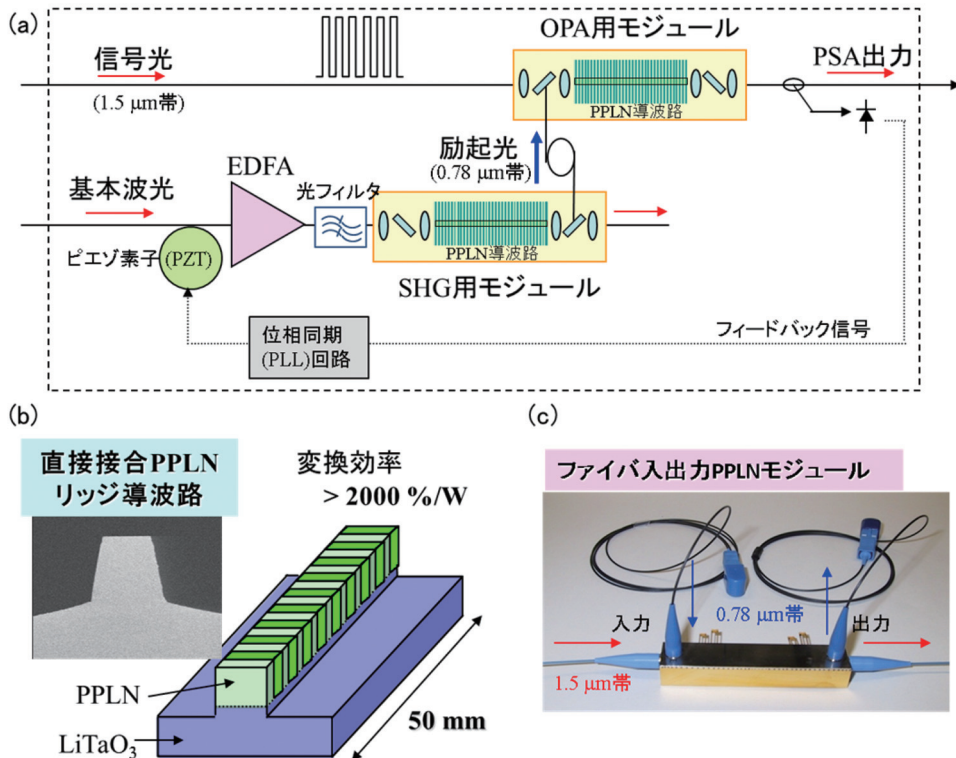


図4：(a)周期分極反転 LiNbO₃(PPLN)導波路を用いた PSA の構成，(b)直接接合 PPLN 導波路構造図と断面 SEM 写真，(c)ファイバ入出力モジュールの概観写真

とモジュールの概観写真を示す。5 × 5 μm ほどの微小領域に光を閉じ込めることで 2000%/W 以上の極めて高い変換効率を達成した。モジュールは、それぞれの波長に適したファイバからの入力を誘電体多層膜ミラーで合分波できる構成としている。これにより、光ファイバと PPLN 導波路との低損失な結合を担保すると同時に安定性が要求される伝送実験等の応用実験を可能としている。

CW 光に対して位相感応光増幅動作させた時の同位相及び直交位相利得の励起光パワー依存性を図5に示す。励起光パワーの増大に対して対称的に、同位相利得が増大、直交位相利得が減衰していることがわかる。10dB 以上の利得が得られ、素子の変換効率と励起光パワーから算出される理論式ともよい一致がみられている。これは PPLN 導波路内で信号光と励起光が空間的に高いオーバーラップをしていると同時に、CW 光での励起により時間的にも高い相互作用が得られており、理想的な位相感応増幅特性が達成できていることを意味している。

次に、変調信号に対する位相感応増幅動作を確認した。図6(a)に示すような 10Gbit/s の強度変調信号を励起光に対して同位相に合わせることで、図6(b)に示すように 10dB 以上の利得と明確なアイパターン開口を持つ出力が得られた。対照的に直交位相に同期させることで図6(c)に示す通り、出力信号は減衰し、変調信号に対しても明確に位相感応増幅が実現できていることがわかる。

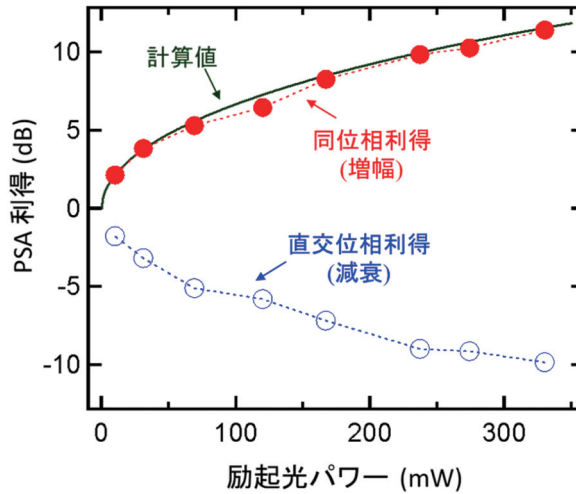


図5：PSAの同位相及び直交位相利得の励起光パワー依存性

さらに本PSAで雑音指数(NF)を評価したところ、従来の増幅器では達成不可能な標準量子限界(NF: 3dB)を超えるNF: 1.8dBの超低雑音増幅が確認出来た[8,9]。この1.8dBの大部分は入力ファイバとPPLN間の結合損失によるもので、結合損の改善によりさらなる低雑音増幅が期待できる。

PSAで用いる非線形光学媒質にはPPLNの他に高非線形ファイバを用いる方法もあり、多くの研究が報告されている[10-12]。2つの媒質の大きな違いの一つは、その相互作用長にある。現状の高非線形ファイバでPSAを構成するためには数百mの長さが必要であるのに対し、PPLNはその高い非線形性からわずか数cmのデバイス長で十分な利得を得ることができる。PPLNが短いことは単にサイズが小さくなるだけでなく、ファイバ型PSAの課題であるブリルアン散乱による雑音がない、位相同期機構の必要なPSAにおいてフィードバック帯域を確保し、高速応答が可能などの実用上本質的な利点を持つ。また高非線形ファイバは三次の非線形光学媒質であるため、励起光に信号光波長と同じ $1.5\mu\text{m}$ 帯の光を用いる。通信波長帯で動作する既存の光学部品や光源を利用できる反面、励起光と信号光の分離という観点からは励起光が信号光の波長帯にあることは好ましくない。これは高強度の励起光を得るために用いるEDFA等からの外的な自然放出光(ASE)雑音の混入が避け難く、NFの劣化を招くからである。一方、二次の非線形光学媒質であるPPLNは、信号光の半波長となる第二高調波を励起光に用いるため、両者を容易に分離できる。それゆえPPLN型PSAでは、励起光に起因した雑音の影響を受けずにPSAを構成できる。

以上の通り、我々はPSAを構成する非線形光学媒質として低雑音性や実用性の点で潜在的可能性を持つPPLNに着目し、従来の拡散型PPLN導波路の課題であった光損傷による特性劣化を克服するため、ドライエッチングによる直接接合型光導波路構造作製技術を開発することで光通信へ適用可能な特性を持つPSAを実現した。

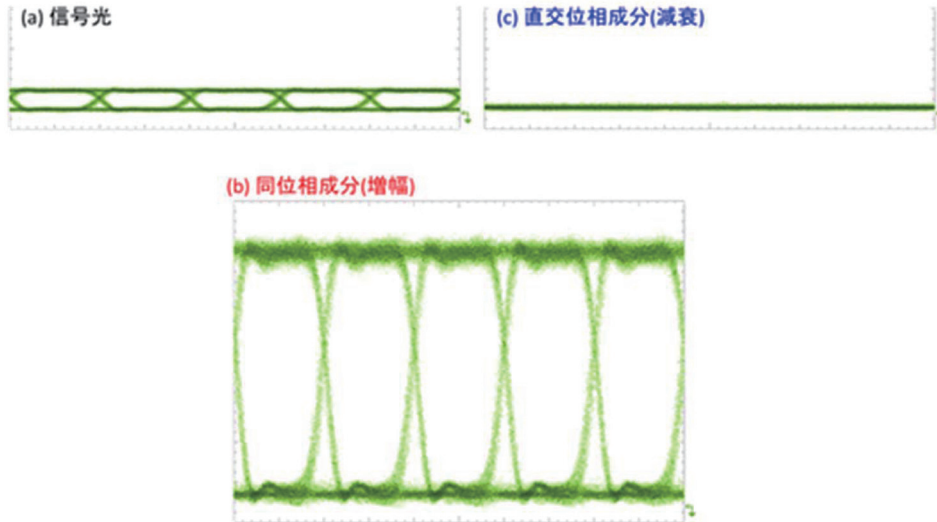


図6：高速変調信号に対する位相感応増幅動作 (a) 10Gbit/s 強度変調を施した信号光のアイパターン，(b) 同位相に同期をした場合の PSA 出力のアイパターン，(c) 直交位相に同期をした場合の PSA 出力のアイパターン

3. 強度・位相再生機能を用いた多中継伝送

PSA の低雑音性や強度・位相の再生能力は、長距離伝送における中継増幅器として複数回用いた場合に顕著な効果が期待できるが、PSA で多段の中継を行った報告はこれまでになかった。我々は BPSK (2 値位相変調) 信号に対して中継増幅が可能なインライン型 PSA を実現、世界で初めて多中継伝送を行い、その有効性の実証に成功した。

図7にインライン型 PSA の構成と動作原理を示す [13]。前節の実験においては、信号光と励起光を生成する基本波長を同一の光源から直接分岐して得ていたが、光中継増幅器として動作させるためには変調された信号光の搬送波位相に同期した CW の励起光を信号光とは独立した局発光から生成する必要がある。BPSK 信号光の一部を分岐し、PPLN 中での SHG 過程により信号波位相を 2 週倍することで位相変調成分を除去した光を、差周波発生 (DFG) 過程により搬送波位相を $1.5\mu\text{m}$ 帯の光に変換し、半導体レーザダイオード (LD) への光注入同期によりキャリア位相を局発光源に同期させる。この構成により、信号光と同期した局発光を外部から入力することなくインライン増幅器としての動作が可能となった。

図8に BPSK 変調に人工的な位相雑音を付加した信号を用いてインライン PSA の動作検証を行った結果を示す。円周上に広がった入力光位相雑音が大幅に抑圧できていることがコンスタレーション上で確認できた。これは PSA の持つ位相雑音の低減効果を示すと同時に、雑音により劣化した信号に対しても搬送波位相の抽出が可能でインライン PSA が動作することを示している。

光ファイバ伝送においてはファイバ中で生じる非線形雑音の抑制が実用上重要である。そこで長距離伝送における中継増幅器としての PSA の有効性を確認するため、図9に示すように、波長分散を補償した 42km の伝送路を用いて周回伝送実験を試みた [14]。周回内の光

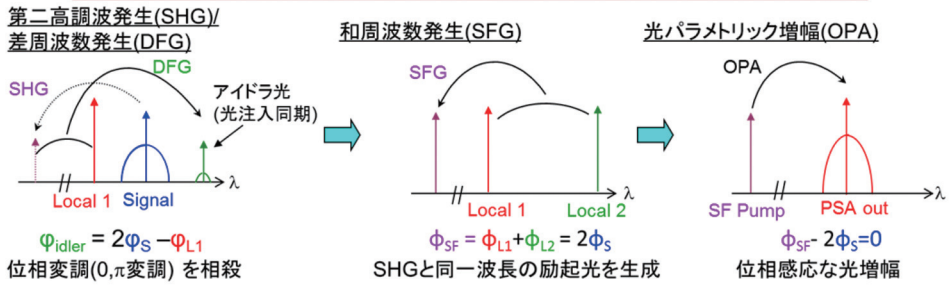
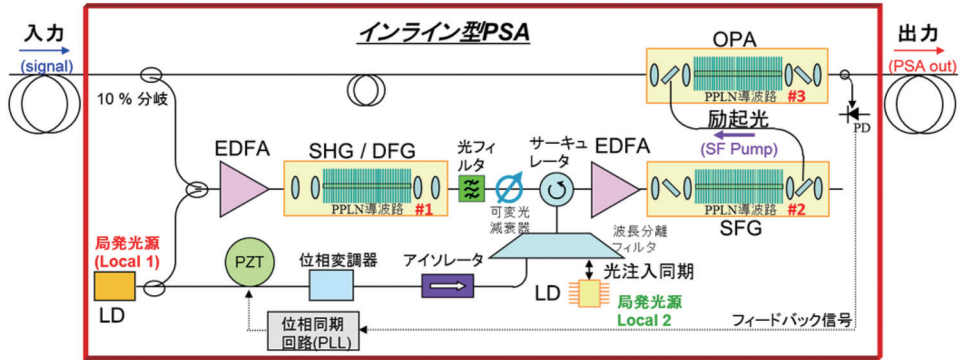


図7：インライン型 PSA の構成と PPLN 導波路中の周波数混合過程

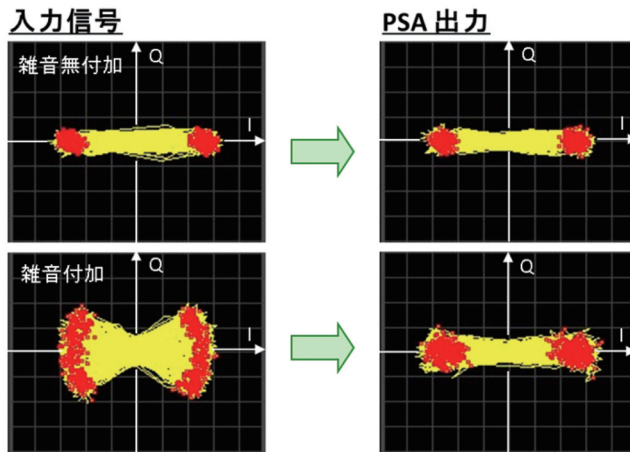


図8：位相雑音を付加していない場合と付加した場合での入力光と PSA 出力光のコンスタレーション

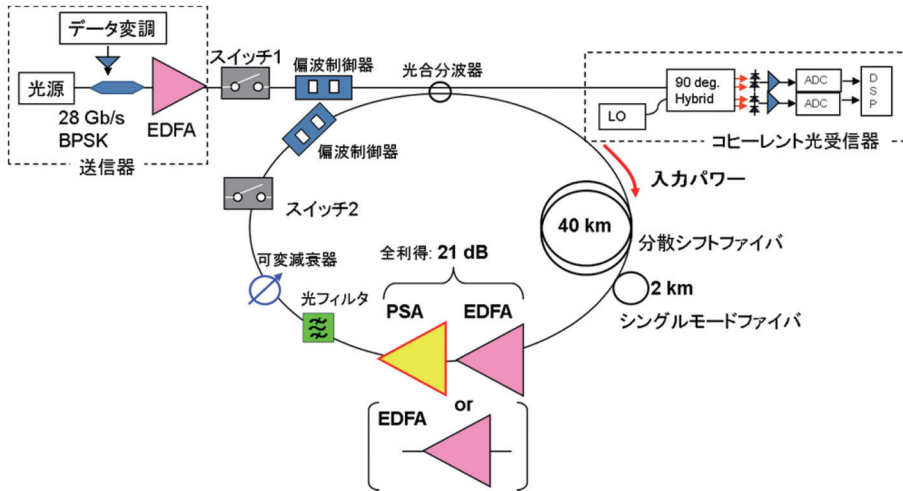


図9：周回伝送の実験系

増幅器構成としては、積極的に PSA の利得飽和効果を得るため、本実験ではあえて EDFA を PSA の前置増幅器として用いた。

安定動作のため、図7中の3つの PPLN モジュールや注入同期局発光源等のインライン PSA の主要光学部品とその電気制御系を図10(a)に示す19インチユニットに収容している。図10(b)に示す通りユニットの全損失5.7dBを加味しても12dBの外部利得を持つBPSK信号に対する高利得PSAを実現している。

同一伝送路においてファイバへの入力パワーを変化させ EDFA 単体での伝送特性と比較した。EDFA を単体で用いた場合に最良の伝送特性が得られた入力パワー -5dBm の条件下における70周回(約3000km)伝送後のコンスタレーションを図11(a)に示す。光ファイバ中の非線形効果と EDFA の自然放光による強度・位相雑音により信号品質が劣化していることが分かる。一方 EDFA と PSA を併用した場合において PSA の利得飽和条件が満たされる入力パワー +7dBm での、同一周回である70周回伝送後のコンスタレーションを図

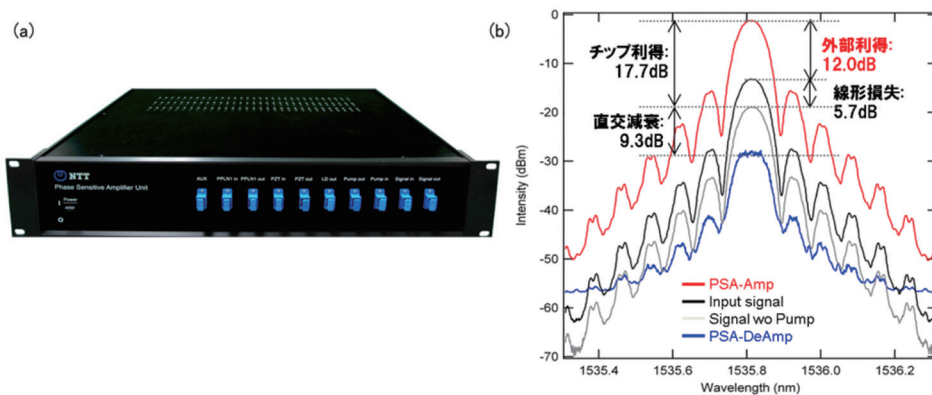


図10：(a) インライン型 PSA ユニットの概観写真，(b) インライン型 PSA の2値位相変調(BPSK)信号に対する増幅特性

11 (b) に示す。PSA のスキューニング効果による位相雑音の低減と利得飽和による強度雑音の低減により信号品質の大幅な改善が確認出来た。

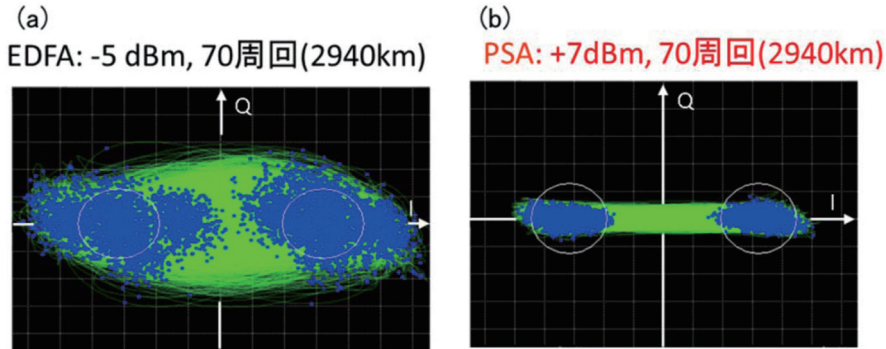


図 11 : PSA を用いた周回伝送実験 (a) EDFA を中継光増幅器として用いた場合のコンスタレーション, (b) EDFA-PSA を中継光増幅器として用いた場合のコンスタレーション

4. マルチキャリア・多値信号への適用

既存の光通信システムや、今後さらなる進展が見込まれるデジタルコヒーレント技術との親和性の観点から複数波長信号と多値変調フォーマット信号の増幅に対応することは極めて重要である。我々はこれまでに非縮退の光パラメトリック増幅過程により位相感応増幅が達成可能であることを示してきた[15]。この非縮退構成では、信号と位相に相関関係のあるアイドラ光を用いることから、多波長化や変調フォーマットに対する柔軟性が飛躍的に向上するとともに、位相相関のある信号対と無相関の過剰雑音との間の利得差が生じることにより雑音低減を図ることが可能など、非縮退構成特有の新たな効果も期待できる[16]。

光周波数コムを用いて位相相関のあるアイドラ光を生成し、複数波長信号を一括増幅した基本実証結果を示す。単一光源から光変調器を正弦波で駆動し、光周波数コムを発生させることで信号光と同位相のアイドラ光を生成した。図12に入力光と PSA 出力光の光スペクトルを示す。中心波長から対称的に離調された形で生成されているのが信号光とアイドラ光の対であり、2値位相変調を施している。図からわかる通り複数の信号対で同利得が得られており、位相相関のあるアイドラ光を用いることで複数波長信号を一括増幅できることを示している。この実験では、キャリア数は光コム生成の構成に制限されているが PPLN 導波路の OPA 過程に対する位相整合は60nm もの波長帯域を有するため、原理的にはさらなる多波長一括増幅が可能である。

さらに非縮退構成において信号光とアイドラ光との間の位相関係を適切に調整することで対応可能な変調フォーマットを拡張することが可能となる。最近我々は、信号光の3倍の位相を持つアイドラ光を用いた QPSK (4値の位相変調) 信号の増幅および、信号光に位相共役(逆位相)なアイドラ光を用いてより高次の多値変調である 16QAM (16値の直交振幅変調) 信号の増幅に成功した [17,18]。非縮退構成においてはアイドラ光の生成方法が鍵となるが、我々は光パラメトリック増幅過程に用いる PPLN 導波路技術をこのアイドラ光生成にも適

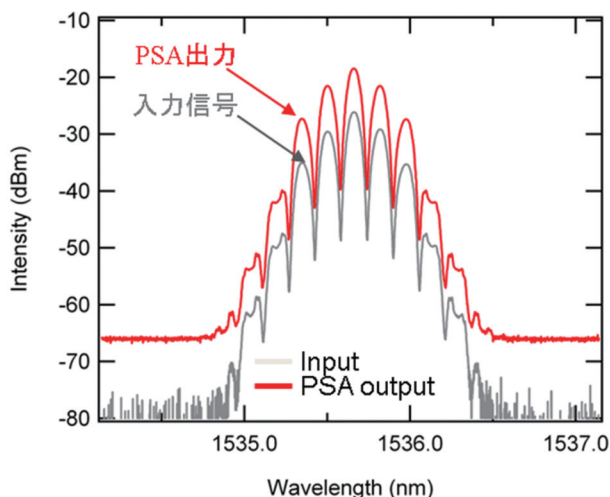


図12：データ変調を施したマルチキャリア信号の入力光とPSA 出力光に対する光スペクトル

用することで特性の良いPSAの実現を可能としている。

非縮退構成を用いた16QAM信号の増幅結果を示す。まず16QAM信号をDFGにより信号に位相共役なアイドラ光を生成した。高効率なPPLN導波路を用いることで信号を損失させることなく信号と同等な高強度アイドラ光の生成に成功している。位相共役なアイドラ光を用いた非縮退パラメトリック過程では、信号とアイドラに同一方向の位相雑音が付加される時、アイドラは信号に対して逆位相を持つ信号を生成し位相雑音が打ち消し合うため、位相雑音のキャンセリング機能が期待できる。実際に変調器により位相雑音を付加した場合の入力信号及びPSA出力のコンスタレーションを図13(a)に示す。信号を識別できなくなるほどの位相雑音を付加してもPSA後では位相雑音が低減され明確に16値を識別できていることがわかる。また自然放出光のような位相相関のない過剰雑音が重畳された信号をPSAにより増幅する場合、信号対は位相関係が定まっているのに対し、過剰雑音はPSAで増幅される同位相成分と減衰される直交位相成分の両方を同等に含んでいるため、信号光とアイドラ光の対は過剰雑音に比べ高い利得で増幅され、信号のSN比を改善できる。実際に自然放出光により強度雑音を意図的に付加し、SN比を劣化させた信号をPSAで増幅した場合の入出力の様子を図13(b)に示す。コンスタレーション上で信号品質が明らかに改善していることが確認出来る。加えて、増幅に伴うコンスタレーション上の信号間距離の変形等は見られないことから、PPLN-PSAは線形性の高い位相感応増幅特性を有しており、強度方向にも多値化されたQAM信号の増幅においても有効であることが確認できた。

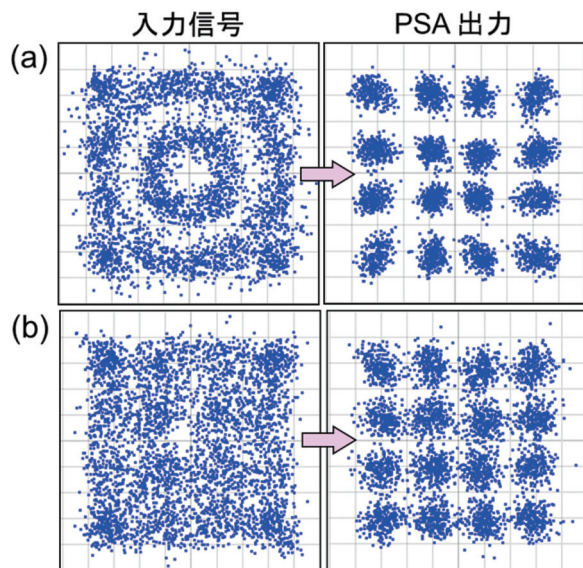


図13：高次多値信号の位相感応増幅 (a) 位相雑音を付加した場合の16QAM信号に対する入力光及びPSA出力光のコンスタレーション, (b) 強度雑音を付加した場合の16QAM信号に対する入力光及びPSA出力光のコンスタレーション

5. 結 論

ネットワーク大容量化の鍵となる光通信システムの抜本的なSN比改善に向け、光通信への適用を目指したPSAの研究開発を行った。高光損傷耐性と高効率性を両立させたPPLN導波路の開発、標準量子限界以下の超低雑音増幅の実証、搬送波抽出機構を備えたインライン型PSAの実現、光ファイバ伝送路における多中継光増幅器への適用による有効性実証、非縮退PSAによるマルチキャリア信号の一括増幅、多値変調信号増幅の実現など、位相感応増幅技術を光通信に適用可能であることを世界に先駆けて実証してきた。本技術の進展によってデジタルコヒーレント光通信技術の持つ潜在能力を最大限に引き出し、将来の基幹系光伝送システムのさらなる大容量化が期待できる。将来のブロードバンドサービスを支える超大容量ネットワークの実現は、情報通信産業への貢献に留まらず、ビッグデータ等のICTを活用する全ての産業への経済波及効果も期待できる[19]。我々はさらなるデバイス特性改善と増幅方式研究により実用化に向けて、研究開発を加速する所存である。

参考文献

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. Inst. Radio Eng. 37 (1), 10-21 (1949).
- [2] R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, "Capacity limits of optical fiber networks," J. Lightwave Technol. 28(4), 662-701 (2010).

- [3] A. Bononi, P. Serena, and N. Rosi, "Nonlinear signal-noise interactions in dispersion-managed links with various modulation formats," *Opt. Fiber Technol., Master. Devices Syst.*, 16(2), 73-85 (2010).
- [4] C. M. Caves, "Quantum limits in noise in linear amplifiers," *Phys. Rev. D Part. Fields* 26(8), 1817-1839 (1982).
- [5] Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga, and H. Suzuki, "0-dB wavelength conversion using direct-bonded QPM-Zn : LiNbO₃ ridge waveguide," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 1049-1051 May. (2005).
- [6] T. Umeki, O. Tadanaga, and M. Asobe, "Highly efficient wavelength converter using direct-bonded PPZnLN ridge waveguide," *IEEE J. Quantum Electron.* 46(8), 1003-1008 (2010).
- [7] T. Umeki, O. Tadanaga, A. Takada, and M. Asobe, "Phase sensitive degenerate parametric amplification using directly-bonded PPLN ridge waveguides," *Opt. Express* 19(7), 6326-6332 (2011).
- [8] 日経産業新聞, "光ファイバ伝送容量 新增幅器で4倍以上に ~ NTTが開発 雑音混入を大幅抑制 ~", 2011年6月28日
- [9] M. Asobe, T. Umeki, and O. Tadanaga, "Phase sensitive amplification with noise figure below the 3 dB quantum limit using CW pumped PPLN waveguide," *Opt. Express* 20(12), 13164-13172 (2012).
- [10] W. Imajuku, A. Takada, and Y. Yamabayashi, "Low-noise amplification under the 3-dB noise figure in a high gain phase-sensitive fiber amplifier," *Electron. Lett.* 35(22), 1954-1955 (1999).
- [11] R. Slavík, F. Parmigiani, J. Kakande, C. Lundström, M. Sjödin, P. A. Andrekson, R. Weerasuriya, S. Sygletos, A. D. Ellis, L. Grüner-Nielsen, D. Jakobsen, S. Herstrøm, R. Phelan, J. O'Gorman, A. Bogris, D. Syvridis, S. Dasgupta, P. Petropoulos, and D. J. Richardson, "All-optical phase and amplitude regenerator for next generation telecommunications system," *Nat. Photonics* 4(10), 690-695 (2010).
- [12] Z. Tong, C. Lundström, P. A. Andrekson, C. J. McKinstrie, M. Karlsson, D. J. Blessing, E. Tipsuwannakul, B. J. Puttnam, H. Toda, and L. Grüner-Nielsen, "Towards ultra-sensitive optical links enabled by low-noise phase sensitive amplifiers," *Nat. Photonics* 5(7), 430-436 (2011).
- [13] T. Umeki, M. Asobe, and H. Takenouchi, "In-line phase sensitive amplifier based on PPLN waveguides," *Opt. Express* 21(10), 12077-12084 (2013).
- [14] T. Umeki, M. Asobe, H. Takara, Y. Miyamoto and H. Takenouchi, "Multi-span transmission using phase and amplitude regeneration in PPLN-based PSA," *Opt. Express* 21(15), 18170-18177 (2013).
- [15] T. Umeki, H. Takara, Y. Miyamoto, and M. Asobe, "3-dB signal-ASE beat noise reduction of coherent multicarrier signal utilizing phase sensitive amplification," *Opt. Express* 20(22), 24727-24734 (2012).
- [16] Z. Tong, C. J. McKinstrie, C. Lundström, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Noise performance of optical fiber transmission links that use non-degenerate cascaded

- phase-sensitive amplifiers,” *Opt. Express* 18(15), 15426-15439 (2010).
- [17] M. Asobe, T. Umeki, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto, “In-line phase-sensitive amplifier for QPSK signal using multiple QPM LiNbO₃ waveguide,” In Proceedings of the OptoElectronics Communications Conference (OECC 2013, Kyoto, Japan) PDP paper PD2-3 (2013).
- [18] 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,” In Proceedings of the European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013, London, UK) PDP paper PD1.C.5 (2013).
- [19] 総務省情報通信白書2012 第2部第4章第1節：
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc241200.html>