

# 論文の内容の要旨

論文題目 光ファイバを用いた位相感応縮退  
パラメトリック光増幅技術の研究

氏名 今 宿 亘

## 1. 本研究の背景と目的

位相感応縮退パラメトリック光増幅技術は、レーザ光増幅技術と同じ線形光増幅のみならず図 1 に示すような光位相依存光増幅動作も実現可能であり、従来の光増幅技術には全く無い機能を提供できる。この光位相依存光増幅動作は、量子光学理論の第一原理である不確定性原理に起因した制約によりレーザ光増幅器を含む従来の線形光増幅器では不可能とされる標準量子限界（雑音指数 3 dB）以下の超低雑音光増幅 [1] を実現すると同時に、波形劣化した信号光パルスに対して波形整形機能 [2] を提供できる可能性がある。本研究は、このような位相感応縮退パラメトリック光増幅技術の優れた潜在能力に注目し、光伝送システムへの適用効果の把握と、非線形ファイバサニャック干渉計とコヒーレント光検波技術を適用した In-Line 型位相感応縮退パラメトリック光増幅器の実現、標準量子限界以下の高利得超低雑音光増幅及び超高速波形整形動作の実証を目指す。

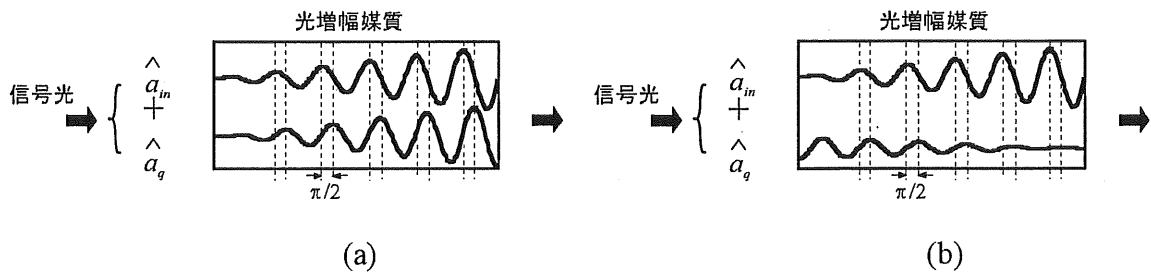


図 1: (a) 位相不感応光増幅器と (b) 位相感応光増幅器の動作の比較

## 2. 本研究の内容

本研究の主な内容と結果を下記に列挙する。

### [I] 位相感応縮退パラメトリック光増幅器を用いた多中継光伝送システムの性能解析

位相感応縮退パラメトリック光増幅器を適用した強度変調直接検波 (AM-DD) 多中継光伝送システムの伝送制限について理論解析を試みる。理想位相感応縮退パラメトリック光増幅器の自然放光パワーは、理想的なレーザ光増幅器、ラマン光増幅器と比較して、同相成分で 1/2 に、直交位相成分は”trivial”になり、結果として 1/4 になることを示す。また光伝送システムにおいては、伝送ファイバの分散と非線形屈折率の影響により信号光の搬送波成分と側波帯成分の自然放光がパラメトリック相互作用を起こすことで変調不安定性が生ずるが、図 2(a) に示すように位相感応縮退パラメトリック光増幅器 (PSA) はこれを抑圧する機能を有することも理論的に示す。さらに、位相感応縮退パラメトリック光増幅器は、信号光波形整形機能も有することを AM-DD 多中継光伝送システムの信号光パルス伝送特性の数値解析により明らかにする。位相感応縮退パラメトリック光増幅器を 40 Gbit/s の AM-DD 多中継光伝送システムに適用すると、前述の位相感応縮退パラメトリック光増幅器の低雑音特性、変調不安定性抑圧特性との相乗効果により、図 2(b) に示すように従来の光伝送システムに対して 3~10 倍まで伝送距離を拡大可能であることを示す。

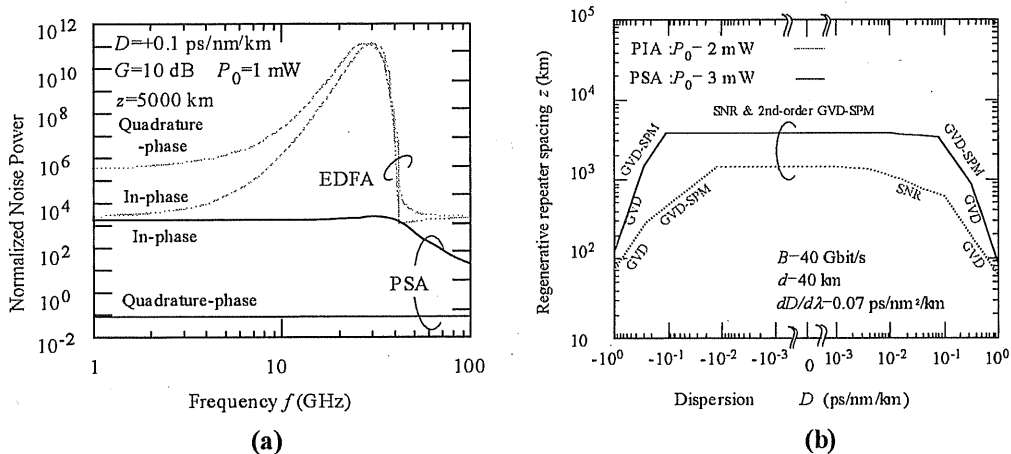


図 2: 位相感応縮退パラメトリック光増幅器 (PSA) による伝送可能距離拡大効果 (a) 変調不安定性の抑圧効果, (b) 最大再生中継間隔の増大

### [II] 位相感応縮退パラメトリック光増幅器における低雑音光増幅条件の把握

位相感応縮退パラメトリック光増幅器の光増幅媒質としての光ファイバ性能指数を導出し、高利得動作を実現する条件を理論的に明確化する。図 3(a) に示すように、長さ 3~5 km 程度のシリカファイバを適用することにより 1 W の励起光パワーで 20 dB 以上の高利得動作を実現できることを理論的に示す。続いて、当該光増幅器が標準量子限界以下の超低雑音光増幅動作を実現する条件についても明確化する。通常、信号光の信号対雑音比は、光損失を受けるのに伴い劣化する。つまり、光増幅媒質として光損失を伴う既存の光ファイバを用いることは、位相感応縮退パラメトリック光増幅器の潜在的な雑音指数劣化を意味する。本研究は、分布光損失のある光ファイバと過剰雑音を有する励起光源を用いた位相感応縮退パラメトリック光増幅器を量子論的にモデル化し、このような点を考慮に入れた雑音指数特性の理論解析を行う。光損失を伴う光ファイバでは、図 3(b) に示すように光損失係数と光ファイバ長の積 ( $\alpha L$ )  $\ll 1.57$  を満足すると、3 dB 以上の光損失がある光ファイバでも標準量子限界を下回る低雑音光増幅が実現可能であることを理論的に明確化する。

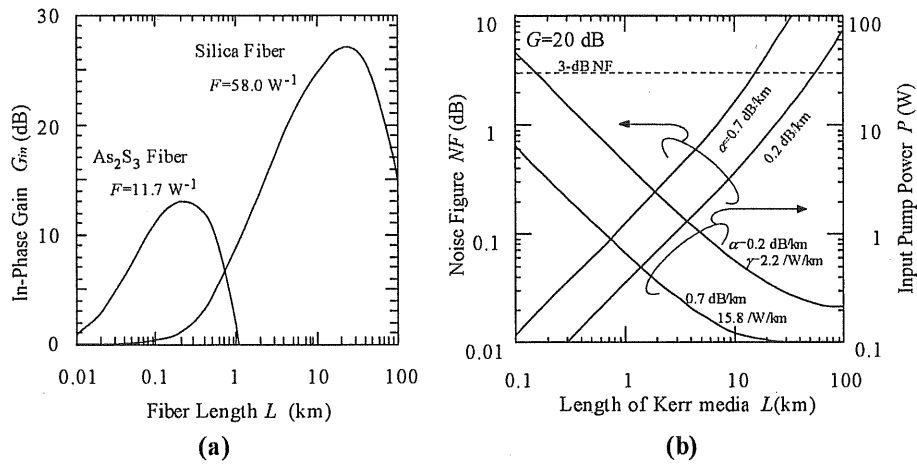


図 3: 位相感応縮退パラメトリック光増幅器 (PSA) の動作解析 (a) 非線形媒質の性能指数, (b) 雑音指数の理論値

る。同時に、励起光の強度・位相雑音に対する要求条件も導出し、標準量子限界以下の低雑音光増幅動作を実現する光増幅器の設計に反映する。

[III] コヒーレント光検波技術を適用した In-Line 型位相感応縮退パラメトリック光増幅器の実現

光ファイバを用いた位相感応縮退パラメトリック光増幅器の実現課題は主に二つある。第一の課題は、同一の光周波数で入力される励起光と信号光の出力側での分離、第二の課題は励起光と信号光の光位同期の実現である。本研究では、図 4(a) に示す構成の光ファイバを用いた非線形サニャック干渉計と 90 度ハイブリッド型光位同期ループ (OPLL) を融合させることにより、同一光周波数の励起光と信号光の出力側での分離、図 4(b) に示すような励起光と信号光の光位相差に依存した光増幅動作、10 dB を超える高利得光位相依存光増幅の連続動作を実現した。さらに本研究は、入力信号光と励起光の光位同期の安定性を向上させる手段として光注入 (OIL)-OPLL 併用構成を提案した。これにより励起光と信号光の光位同期がより安定化され、図 4(c) に示すようなデジタル強度変調光信号入力に対してビット誤りの無い In-Line 型位相感応縮退パラメトリック光増幅器を実現した。

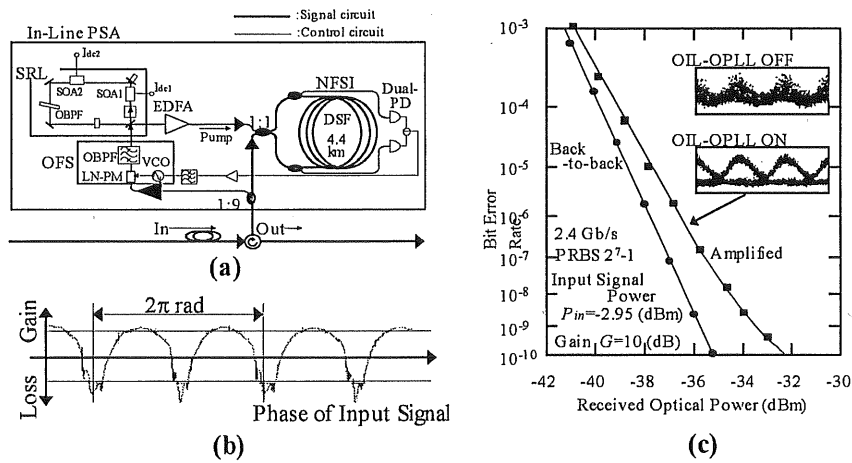


図 4: In-Line 型位相感応縮退パラメトリック光増幅器の実現 (a) 製作した光増幅器の構成, (b) 光位相依存光増幅動作の実証, (c) 増幅信号光のビット誤り特性

#### [IV] 位相感応縮退パラメトリック光増幅器における低雑音光増幅・波形整形動作の実証

試作した位相感応縮退パラメトリック光増幅器の動作特性を評価した。長さ  $L = 3$  km、光損失係数  $\alpha = -0.7$  dB/km、非線形係数  $\gamma = 15.8$  /W/km の光ファイバを有する非線形ファイバサニャック干渉計構成を用いて、26 dB (1 W 励起光時) の高利得動作を実証した。続いて、信号光パルスの超高速波形整形動作の実験検証も加えた。図 5 に示すように、85 ps/nm の分散媒質によりパルス幅が 50 ps 以上に波形劣化した信号光パルス (図 5(a)) を、位相感応縮退パラメトリック光増幅器の光位相依存光増幅動作によりパルス幅 20 ps の光パルス (図 5(b)) に再生できることを実証した。さらに、雑音指数の実験評価も行った。光ファイバの導波性音響ブリルアン散乱 (GWABS) により雑音特性が劣化するものの、図 5(c) に示すように GAWBS が支配的でない一部の変調周波数領域では雑音指数 2.0 dB が得られ、標準量子雑音限界以下の低雑音光増幅を実証した。

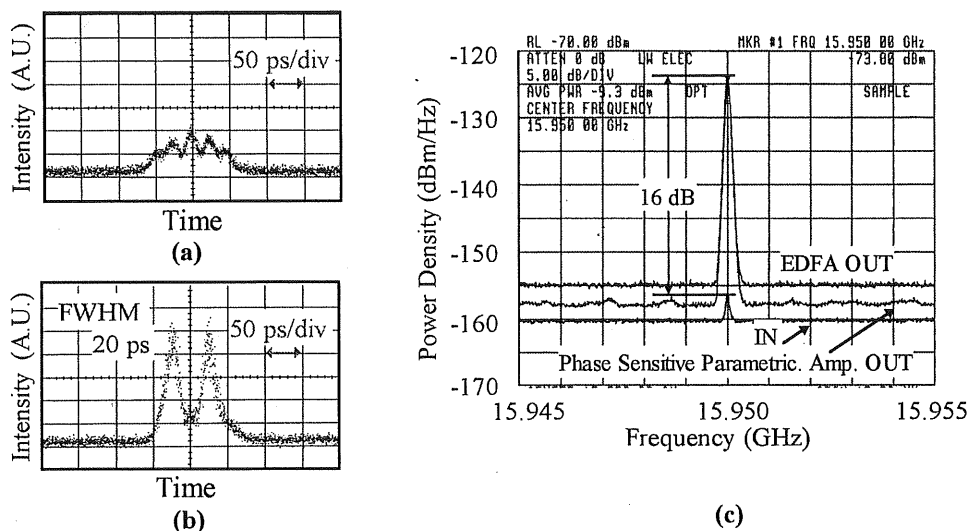


図 5: 位相感応縮退パラメトリック光増幅器の波形整形動作と低雑音特性 (a) 入力信号光波形, (b) 出力信号光波形, (c) 出力信号光と自然放光のビート雑音スペクトル

### 3. まとめと本研究の意義

本研究は、非線形ファイバサニャック干渉計とコヒーレント光検波技術を用いた In-Line 型位相感応縮退パラメトリック光増幅器を実現し、入力信号光の変調速度に対する柔軟性を確保しつつ、標準量子限界以下の低雑音光増幅機能と、超高速波形整形機能を有する高利得光増幅器を初めて実証した。本研究は、通信工学と量子光学の両面から行ったものであり、両学術分野に理論・実験の両面で新たな知見を与えるものである。位相感応縮退パラメトリック光増幅技術が、将来の超高速光伝送システムの構築や光のコヒーレンスを活用した光信号処理回路において有効な信号処理機能を提供できる可能性を示すものである。

### 4. 参考文献

- [1] C. M. Caves, "Quantum limits on noise in linear amplifiers," *Phys. Rev. D.*, vol. 26, pp. 1817-1839, Oct. 1982.
- [2] R. -D. Li, P. Kumar, and W. L. Kath, "Dispersion compensation with phase-sensitive optical amplifiers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-12, pp. 541-549, July 1994.