

博士論文(要約)

周期分極反転 LiNbO₃ 導波路を用いた非線形光学
デバイスの高性能化と位相感応光増幅器への応用

梅木 毅伺

光通信システムは情報流通を支える基盤技術として、広帯域な波長多重技術や周波数利用効率の高い多値変復調技術などの様々な技術革新により、その登場以来 30 年で 5 桁以上もの容量拡大が実現されるなど飛躍的な進歩を遂げてきた。しかし近年では光ファイバを用いて伝送する情報量の増大に伴い光ファイバへの入力パワーが増大し、非線形シャノン限界と呼ばれる光ファイバ中の非線形光学効果に起因した伝送容量の限界が指摘され始めている。そのため非線形雑音を軽減するべくデジタル信号処理をはじめとして様々な対策が研究されている。ハードウェアの観点からも光パワーを増大させずに光信号の雑音を低減することで信号雑音比を向上させるか、または高い入力パワーの条件下での非線形雑音を抑制する技術を研究開発する必要がある。その候補の一つとして近年位相感応光増幅器 (PSA) が注目されている。現代の光通信システムにおいて光増幅器は重要な役割を担っており、現状ではエルビウム添加増幅器 (EDFA) や半導体光増幅器 (SOA) やラマン光増幅器などのレーザ増幅器が広く用いられている。しかしながら、誘導放出 (または散乱) を用いたこれらの位相不感応増幅器 (PIA) の雑音指数 (NF) は、3 dB の量子限界よりも低くはならないことが知られている。位相感応増幅器 (PSA) は、NF: 3 dB の量子限界以下の低雑音増幅の可能性や位相変調信号の位相再生効果を持つことから精力的に研究が行われている。PIA と PSA の本質的な違いは、PSA は信号光の 2 つの直交する位相成分のうち、片方の位相成分のみを増幅し、直交する位相成分には減衰を与える点にある。この特徴的な性質が、原理的に 0 dB の量子限界を持つ低雑音増幅や、直交位相成分の圧縮による位相再生効果を生み出すことができる。また、増幅器を飽和状態で用いることで位相雑音に加え強度雑音に対しても同時にその信号品質を再生できる可能性を有する。

本研究の目的は、非線形シャノン限界による容量限界の打破に向けて、標準量子雑音以下の低雑音増幅と信号品質の再生機能を併せ持つ $\chi^{(2)}$ を用いた PSA の可能性に注目し、周期分極反転 LiNbO₃(PPLN) 導波路を用いた非線形光学デバイスの高性能化により、PSA への応用を図ることにある。詳述すると、従来の拡散型の導波路では実現することのできなかつた高い光損傷耐性を有する直接接合型の周期分極反転 LiNbO₃(PPLN) 導波路において加工技術の抜本的な高度化により高効率化と高機能化を達成することにある。光通信に应用可能つまり CW 励起で正味の利得が得られるような形での $\chi^{(2)}$ デバイスを用いた PSA を実現し、ファイバ伝送路における中継増幅器に適用しその有効性を実験的に実証することにある。

本論文は下記の項目を主な内容としている。

- [1] PPLN デバイスの高性能化：導波路加工へのドライエッチング技術の適用による、高効率 PPLN 導波路の実現、同時に $\chi^{(2)}$ デバイスの平面光回路展開による高機能化の可能性の開拓
- [2] 位相感応増幅器 (PSA) の実現と基本動作検証：CW 励起で動作可能な位相感応光増幅器の実現と標準量子雑音以下の低雑音性の実証及び複数波長信号の一括増幅の実現可能性の実験的な検証
- [3] 中継増幅器への適用による多中継伝送路での有効性実証：中継増幅が可能なインライン型 PSA の実現とそれを用いた多中継伝送による位相感応光増幅器の光伝送システムにおける有効性の実証

本論文は、2007 年～2012 年にかけて行われた上記内容の研究を総括したもので、非線形光学デバイスの改良による PSA の実現、基本動作及び光伝送システムへの適用可能性検証に実験的に挑んだものである。

光通信システムへの適用が可能な PSA を実現するためには、高強度の励起光入力と高い変換効率を両立可能な 2 次非線形デバイスの実現が必要である。本研究では、従来の拡散型の導波路に比べ飛躍的に光損傷耐性に優れる直接接合 PPLN 導波路において、その導波路加工手段にドライエッチング技術を導入することで抜本的な高効率化を達成した。さらに、その高効率な導波路型非線形光学デバイスの特性を明らかにした。周期分極反転構造を施した LiNbO₃ を低屈折率な同種基板上に直接接合し研削と研磨により薄膜化した後ドライエッチング加工により導波路を形成した。規格化変換効率として 2400 %/W の高い変換効率を達成すると同

時に、光損傷耐性に優れる直接接合導波路を用いることで 100 mW 以上の励起光が十分生成可能であることを明らかにした。これらの特性より CW 励起での利得動作の可能性を見出すに至った。次に、光ファイバとの結合を安定的にとることの出来るモジュール形態にリッジ導波路を実装し光パラメトリック増幅特性を評価した。その結果、モジュールの -4 dB と低損失な挿入損失と、導波路による $+8$ dB と高いパラメトリック利得により、ファイバー入出力間で、 $+4$ dB の利得を持つ動作を実現した。これは、モジュールのファイバ入出力間で正味の利得が得られていることであり、光増幅器としての潜在的能力を持つ 2 次非線形光学デバイスを実現したことを意味している。

導波路形成にドライエッチング加工を用いることの更なる利点は、導波路を直線のみならず 2 次元平面方向に展開しフォトマスクの設計次第で任意のパターンを形成できるようになることである。本研究では、光半導体等では広く用いられている多モード干渉 (MMI) を用いた光合分波手法を、直接接合 LiNbO_3 リッジ導波路において初めて適用し、 $1.56 \mu\text{m}$ と $0.78 \mu\text{m}$ の波長の大きく異なる 2 波長に対する波長合分波器を実現した。さらに、直接接合導波路において、非線形光学デバイスである周期分極反転導波路による波長変換器と線形光学デバイスである多モード干渉を用いた合分波器の 1 チップ上でのモノリシック集積に成功し、複数の機能素子を一体で集積できる可能性を見出した。

高効率かつ光損傷耐性に優れる直接接合 PPLN リッジ導波路を用いることではじめて CW 励起での PSA を構成することが可能となった。第二高調波発生による励起光生成と第二高調波励起による光パラメトリック増幅のために 2 つの高効率 PPLN 導波路をそれぞれに用いて CW 励起の光パラメトリック増幅による PSA を構築した。誘電体多層膜ミラーによる波長選択性と短波長のシングルモードファイバの長波の不透過性の併用により、基本波長の光パラメトリック増幅過程への漏れ込みを 80 dB 以上の高い消光で抑制することに成功した。これにより励起光生成のための基本波長の増幅に EDFA を用いても基本波長及び EDFA から寄生的に発生した自然放出光の混入なく縮退光パラメトリック増幅に基づく PSA を構築することが可能となった。同位相信号に対して $+11$ dB の利得、直交位相信号に対して -10 dB の減衰を確認し、励起光と信号光の間で、空間的・時間的に十分なオーバーラップが得られていることにより、ほぼ理想的な増幅特性と減衰特性が得られた。また、PPLN 導波路の正確な位相整合特性により副次的な波長変換過程が発生しないため、小信号での利得飽和は起こらず $+20$ dBm 以上の高強度の出力が可能であることを確認した。さらに、強度変調信号 (10 Gbit/s NRZ) に対しても構成した PSA が機能することを確認し、構成した PSA が光通信システムに用いられる高速変調信号を増幅可能であることを実証した。そして、PSA の雑音指数 (NF) を光領域及び電気領域の異なる方法で評価し、いずれの方法においても低雑音な増幅特性を確認し、PPLN を用いて構成した PSA が標準量子雑音以下の低雑音増幅器として動作していることを実証した。さらに、光通信応用では極めて重要である複数波長信号の一括増幅を非縮退光パラメトリック増幅過程により達成可能であることを示した。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、位相相関のある信号対と無相関の雑音との間に利得差が生じ、これにより雑音低減が図れることも実験的に実証した。

PSA の持つ低雑音性や強度及び位相再生効果は、中継増幅器として複数回用いた場合、長距離伝送において非常に大きな効果を与えることができる。しかしながら、PSA を複数回用いた多中継の光増幅器として適用し、その効果を実験的に明らかにした例は世界的に見てもこれまでになかった。本研究では、波長変換と光注入同期をベースとした搬送波抽出と位相同期機構を構築し、2 値の位相変調 (PSK) 信号に対して中継増幅動作が可能なインライン型の PSA 動作を実現し、中継伝送において PSA の有効性実証の結果を示した。信号光の一部を分岐し、波長変換の技術を用いて信号波位相の 2 倍を取ることで、PSK 信号からキャリアの位相を抽出する。光注入同期により、キャリア位相を局発光に同期させることで信号光と同期した局発光を増幅器内で生成し、インラインでの増幅に成功した。また、このインライン型 PSA を用いて光ファイバ伝送シス

テムにおける重要な問題である非線形効果により生じた位相雑音に対する低減効果の実証にも成功した。最後に、分散を補償した周回伝送リンクにおいて通常のレーザ増幅器 (EDFA) と位相感応増幅器を適用した場合における特性を検証した。PSA を適用したリンクにおいては、EDFA を前段の光増幅器とし、PSA を後段の光増幅器として構成し、直交位相成分を減衰させる PSA 特有の位相再生効果に加え、利得飽和を積極的に活用し強度雑音の低減（強度再生）も可能とした。これらにより PSA を用いた周回リンクでは信号品質の減衰が EDFA の周回リンクに比べて明らかに緩和されていることを示し、長距離伝送における非線形劣化に対するトレランス改善効果を PSA が有していることを実験的に実証するに至った。