

ふじさき あきら
氏 名 藤 崎 晃
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 通信工学専攻
学 位 論 文 題 目 波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯高出力エルビウム光ファイバ増幅器に関する研究
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 中沢 正隆 東北大学教授 山田 博仁
東北大学教授 上原 洋一 東北大学准教授 吉田 真人

論文内容要約

波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)の出現によって光ファイバ通信の大容量化は飛躍的に進展し、情報通信社会の礎となっている。EDFA による $10\ \text{W}$ 以上の高出力な光増幅技術は、光ファイバ通信のみならず、衛星間光通信や光コムを利用した高精度光計測等への応用にも大変有用であると期待されている。著者は波長 $1.48\ \mu\text{m}$ のカスケードラマンレーザ(CRL: Cascade Raman Laser)を励起光源として使用した高出力・高効率 EDFA を開発し、これを用いて狭線幅コヒーレント CW (Continuous Wave)光の $10\ \text{W}$ 以上への増幅を実現した。また、本 EDFA を高繰り返しフェムト秒光パルスの増幅に適用するとともに、その高いピークパワーを活かして高繰り返しマルチギガヘルツ光コムのスペクトルを高非線形ファイバにより 1 オクターブ拡大することに成功している。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 5 章より成る。

第 1 章は序論であり、EDFA の高出力化に関する歴史的背景を踏まえた研究動向、および高出力 EDFA が必要とされている新たな応用分野について述べ、高出力 EDFA を実現するために解決すべき課題を明らかにし、本研究の目的と論文構成を示している。

第 2 章では、CRL 励起による高出力 EDFA を用いたコヒーレント CW 光の増幅について述べている。まず、EDFA の高出力化のために励起光源に要求される特性として、EDFA の増幅原理、高出力化で課題となる光ファイバ中の非線形現象である誘導ラマン散乱ならびに誘導ブリルアン散乱の発生について述べ、EDFA の励起光源の現状として半導体レーザの現状とコア励起、クラッド励起についての比較を議論している。また大出力励起光源として波長 $1.117\ \mu\text{m}$ で発振する Yb ファイバレーザ(YDFL)をラマンシフトする事により得られる波長 $1.48\ \mu\text{m}$ の CRL について、動作原理と、消費電力の低減手法について述べている。さらに $20\ \text{W}$ 超出力の CRL を励起光源としたコア励起型の EDFA の設計について、数値解析を行い、CRL 励起による高出力 EDFA の設計手法を示している。また、低非線形増幅および高効率増幅を実現するために、エルビウム添加ファイバの濃度ならび長さを最適化している。そして実際に作製した EDFA を用いて、線幅 $6\ \text{kHz}$ のアセチレン周波数安定化ファイバレーザの出力を $11.6\ \text{W}$ に増幅することに成功している。本増幅過程において非線形光学効果による線幅広がりや誘導ブリルアン散乱は生じておらず、光源の高いコヒーレンスを維持した低非線形光増幅を実現している。

また、その電気光変換効率は 12 %に達している。この結果は 10 W 級の高出力光増幅を従来にない高い効率で実現した優れた成果であり、衛星光通信通信等の応用展開が期待されている。

第 3 章では、CRL 励起高出力 EDFA を用いた高繰り返し超短光パルスである光コムの高出力増幅について述べている。固体レーザにより発展してきた光コムを全光ファイバで実現することは、光コムにより実現される光計測装置の小型化、安定化、信頼性向上に大きく貢献すると考えられ、数々の研究が行われてきている。特に EDFA を使った波長 1.55 μm 帯の波長は基本的にアイセーフであり、光コムの応用分野を広げる大事な研究である。繰り返し 10 GHz を超えるマルチギガヘルツの光コムは、光スペクトルとして広いモード間隔を実現するため、各縦モードを光フィルタ等による光学的な分光をすることが可能になり、その利便性が大きく増大すると考えられるが、そのオクターブ拡大については困難で、関連する従来研究は繰り返し 1 GHz 程度に留まっている。高繰り返し短パルス光信号の増幅時には非線形光学効果のみならず分散による波形歪みを抑制することが大変重要である。本章ではまずモード同期ファイバレーザから出力される繰り返し周波数 10 GHz のピコ秒パルスを準備し、この後段に、ソリトン断熱圧縮を実現する Comb-like Profile dispersion Fiber (CPF)、および Dispersion Decreasing Fiber (DDF)、また、自己位相変調(SPM)による光スペクトルの拡大を利用する Dispersion Flattened Fiber (DFF)の 3 種類のファイバを準備し、これにより得られる 100~200 fs の圧縮光パルスを作成した。この高繰り返し超短パルス光を、光コムの拡大時に障害となる CRL 光源からの低次ラマン光や、残留励起光を除去した CRL 励起構成の、さらに分散を制御した高出力コア励起 EDFA で増幅を行い各圧縮手段による高出力光増幅について比較検討を行った。その結果最終的に DFF を用いた光源により、出力光として、図 1 に示す様な 10 GHz 繰り返しでパルス幅 79 fs、出力 13 W のパルス光の生成に成功した。

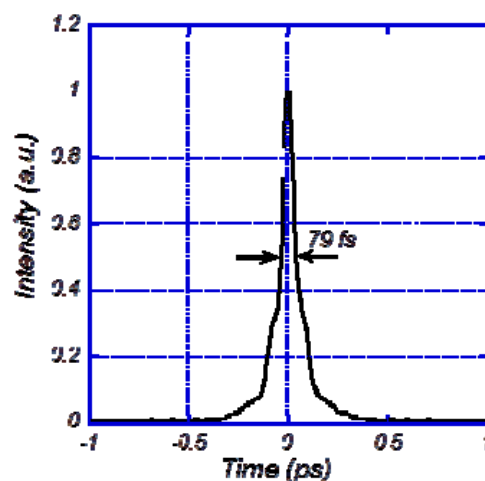


図 1 10 GHz、13 W、79 fs の出力光の自己相関波形

この結果は EDFA を用いて 10 GHz の高い繰り返し周波数で 100 fs 以下の光パルスを 10 W 以上の高い出力で生成できることを初めて明らかにしたものであり、EDFA の高機能化として極めて重要な成果と考えられる。得

られたパルス光の振る舞いについては非線形シュレディンガー方程式により得られた数値解析と整合しており、本方式の有効性を確認することができた。本章ではさらに低非線形光増幅を実現する Very Large Mode Area EDF による光増幅の検討も行い、CRL による励起コア励起光増幅技術の今後の拡張性を述べている。

第 4 章では、高出力 EDFA で生成した高繰り返し光コムのスペクトル拡大について述べている。第 3 章で実現した高出力フェムト秒パルスの高いピークパワーに着目し、本光パルスを分散が異なる 3 種類の高非線形ファイバ (非線形定数 $11.1\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) を準備し、光スペクトルの拡大実験を行った。最終的にゼロ分散波長が 1342nm と最も短いファイバ(0.3m)にこの光を伝搬させることにより、図 2 の様に 1 オクターブにわたり光スペクトルを拡大できることを明らかにした。本光コムは繰り返し周波数が高く縦モード 1 本あたりのパワーが高いことを特徴とすることから、このような広帯域光スペクトルは光コムを用いた標準・計測ならびに光マイクロ波工学等への応用に大変有用である。

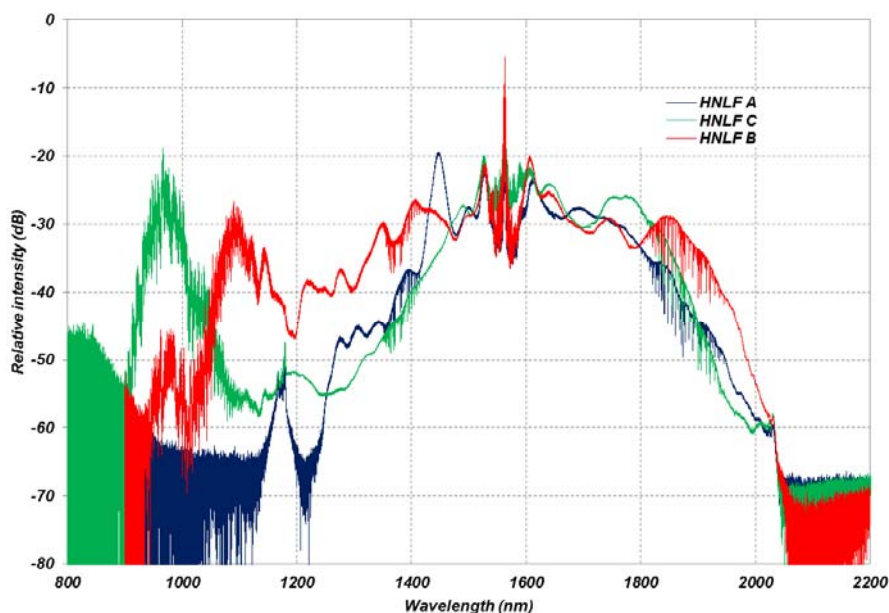


図 2 高非線形ファイバによる光コムスペクトルオクターブ拡大

第 5 章は結論であり、各章の成果をまとめており、本研究の今後の展望について述べている。

以上、本論文は、CRL 励起により高い電気光変換効率を特徴とする高出力 EDFA を構築し、本 EDFA を用いて狭線幅コヒーレント CW 光および 10GHz 帯高繰り返しフェムト秒光パルスに対し 10W を超える高出力・高性能な光増幅を達成したものである。これらの成果は高出力 EDFA の高機能化および実用性の向上、ならびに空間光通信や光コムのスペクトル拡大など高出力光増幅技術の新たな応用分野の開拓に有益な知見を与えるもので、光通信・計測工学の発展に寄与すると考えられる。