

学内グラント 報告書

平成26年度 学内グラント終了時報告書

ファイバーレーザー励起波長可変・中赤外光源と生体分光への応用

研究代表者 鈴木 将之 (大学病院 眼科)

緒言

光を用いた分光法は、試料を非破壊かつ *in vivo*、リアルタイムで分析することが可能である。特に分子の基本振動を直接的に励起可能な中赤外分光は、ラベルフリーのバイオイメージングへの応用が期待されている。従来の中赤外分光はマイケルソン型FT-IR分光法が主に用いられる。しかしFT-IR分光はリアルタイム計測が困難であり、得られる情報は線形分光の範囲を超えない。一方、パルス幅100 fs (fsは10 マイナス 15 乗秒) 以下の短パルスレーザーを用いた非線形分光は(二光子吸収分光やコヒーレントラマン分光など)、リアルタイム計測が可能であり、線形分光では得られない情報を取得することが可能である。

非線形効果を引き起こすことができる中赤外域の短パルスレーザーは直接発振が困難である。そのため赤外域のチタンサファイアレーザーを励起源とした光パラメトリック過程を利用した波長変換にて、中赤外域の短パルス光生成を行っている。チタンサファイアレーザーは固体レーザー励起であり、装置は大型かつ複雑な光学素子で構成されており、長期間の安定性が低いなどの課題がある。そのため臨床現場には不向きであり、新たに簡便かつ小型の光源開発が望まれる。チタンサファイアレーザーに代わる新たな光源として波長1000 nm帯で発振可能なイッテルビウム (Yb) 系材料のレーザーが注目を浴びている。特に波長976 nmのレーザーダイオード (Laser Diode: LD) の高度化とファイバー型光学素子の進展により、波長1000 nm帯のYbファイバーレーザーの出力特性は著しく進展し続けている。ファイバーレーザーは導波路構造を有するため、高安定かつ小型、高出力化が可能であり、メンテナンスフリーが実現可能である。

そこで本研究では、チタンサファイアレーザーに代わる新たな光源開発を目的として小型で高効率、高安定動作が可能なYbファイバーレーザーシステムの要素技術開発を行った。具体的にはYbファイバーを用いた発振器と増幅器および回折格子を用いたパルス圧縮器で構成されるYbファイバーレーザーシステムの開発を進めた。

材料と方法

Fig. 1 に開発したYbファイバーレーザーシステムの

概略図を示す。システムはYbファイバー発振器とYbファイバー増幅器、パルス圧縮器から構成されている。発振器から出射されるレーザーは、増幅器にて出力増大される。このとき発振器からの波長1040 nmのレーザーはYbファイバー増幅器中を伝搬すると正の分散が加算されるためパルス幅が伸長される。そこでファイバーで加算された正の分散と同じ量の負の分散を与えてパルス圧縮を行う。

発振器はLDと波長分割多重通信 (wave division multiplexer: WDM)、Yb添加ファイバー (Yd-doped fiber: YDF)、コリメーションレンズ (collimation lens: CL)、4分の1波長板 (quarter wave plate: QWP)、2分の1波長板 (half wave plate: HWP)、偏光ビームスプリッター (polarizing beam splitter: PBS)、反射型回折格子 (diffraction grating: DG)、ミラー (mirror: M)、ファラデーアイソレータ (Faraday isolator: FI) を用いたリング型の共振器構成と

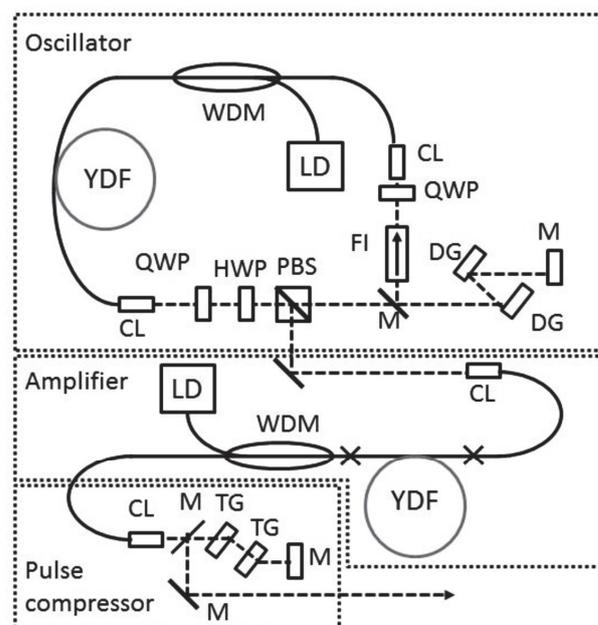


Fig. 1. Schematic layout of the Yb fiber laser system. LD: laser diode, WDM: wave division multiplexer, YDF: Yd-doped fiber, CL: collimation lens, QWP: quarter wave plate, HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, DG: diffraction grating, M: mirror, FI: Faraday isolator, and TG: transmission grating.

した。LDから出射される波長 976 nmの光はWDMを用いてファイバー内に導かれ、YDFを励起する。YDFで励起された波長 1040 nmの光は共振器内でレーザーとして発振する。レーザーの伝搬方向はFIで制御し、Fig.1においては反時計回りで伝搬する。発振器のモード同期は非線形偏波回転法を用いた。非線形偏波回転法は光カー効果を利用するためパルス幅 100 fs以下のパルス生成が可能である。HWPと2枚のQWPを用いて光の偏波制御を行い、モード同期発振を得た。2枚のDGを用いて発振器内のファイバーの分散補償を行った。そしてPBSを用いて発振したレーザーは共振器の外部に取り出される。つぎに取り出された光はミラーを用いてYbファイバー増幅器へ導かれる。増幅器はCLとYDF、WDMを用いた後方励起型のシングルパス構成とした。CLを用いてYbファイバー内に入射された波長 1040 nmのレーザーはYDFで増幅される。増幅された光は、CLを用いて再び空間中に取り出されてパルス圧縮器へ伝搬される。透過型回折格子 (transmission grating: TG) 対を用いてパルス圧縮器を構成し、ファイバー増幅器で加算された正の分散の補償を行った。

結果

発振器のファイバーの全長を1350 mmに固定して、2枚の回折格子 600 lines/mmの間隔を調整して共振器内の分散値を制御した。回折格子間隔を 28 mmとしたときに出力 100 mW、スペクトル幅 110 nmを得ることに成功した (Fig. 2)。つぎにYbファイバー増幅器にて発振器からのレーザーの増幅を行った。Ybファイバーの長さを 2 mに固定して増幅試験を行った。励起LDエネルギー 700 mWのとき出力 350 mWを得た。しかし波長 1060 nmより長波長側における増幅率は低かった。最後に回折格子対を用いてパルス圧縮を行い、パルス幅 70 fsが得られた。

考察

発振器内の分散値をゼロに近づけたとき最も広いスペクトルが得られた。その理由は共振器内に蓄積される光のピーク強度が高くなり、光パルスは自己位相変調効果を引き起こした結果、スペクトルが広がったと考えられる。光のピーク強度はレーザーのエネルギーをパルス幅で割った値で定義される。分散がゼロに近いときパルス幅は短くなる。そこで回折格子対の間隔を調整して発振器内の分散値がゼロから離れた値に設定するとスペクトル幅は狭くなった。これは光のパルス幅が広がることでピーク強度が下がり、共振器内で自己位相変調が生じなかったためである。

増幅器において波長 1060 nmより長波長側の増幅率が低い理由は増幅器内にて利得狭窄を生じた結果である。Fig. 3に増幅後のスペクトルとYbファイバーの誘導放出断面積 (emission cross-section) の計算結果を示す。Fig. 3の灰色実線に示すように、Ybファイバーの利得帯域は波長 980 nmから 1150 nmである。しかし波長 1060 nm

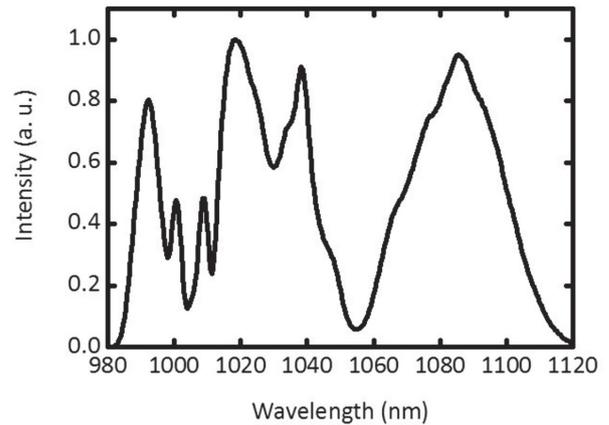


Fig. 2. Measured output spectrum from oscillator. The bandwidth of the output spectrum was measured to be 110 nm (full width at half maximum).

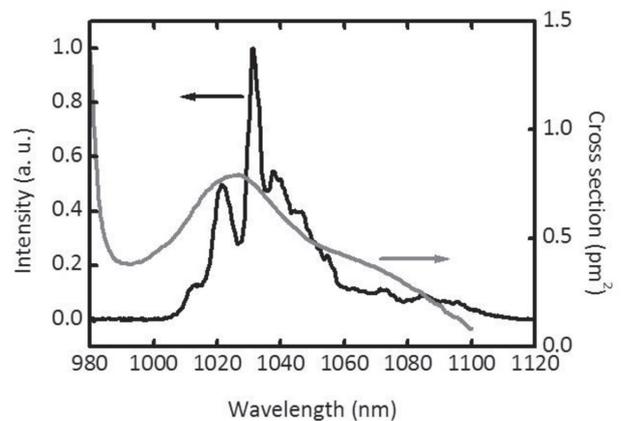


Fig. 3. Measured output spectrum from Yb fiber amplifier, and calculated emission cross-sections for Yb fiber. The black and gray curves represent the amplified spectrum, and the calculated emission cross-section, respectively.

より長波長側の誘導放出断面積は、ピークの約 2 分の 1 程度であった。レーザー発振は誘導放出断面積に依存し、高い誘導放出断面積を有する波長域においてレーザー発振は比較的容易に起こる。スペクトルフィルターを用いて波長 1050 nm以下のレーザーをカットして増幅試験も行った。このとき出力は約 2 分の 1 に低下した。以上のことから波長 1060 nm以上の波長域における増幅率の低下はYbファイバーの有する誘導放出断面積の低下によるものと判断した。

パルス圧縮器を用いて得られたパルス幅 70 fsは発振器から得られるレーザーを再圧縮したパルス幅 30 fsよりも長い。レーザーのパルス幅とスペクトル幅は不確定性原理により定義され、それらの値を掛け合わせた値は一定値となる。すなわちスペクトル幅が広くなればパルス幅は短くなる。本実験において発振器からのレーザーを圧縮したパルス幅と比較して増幅後の圧縮したパルス幅が長く

なった理由は、増幅器で生じた利得狭窄によるスペクトル幅の狭帯域化に起因するものである。ただし増幅後に再圧縮したパルス幅は 100 fs 以下であり、非線形効果を起こすには十分に短いと考えられる。

以上の要素試験からパルス幅 100 fs 以下の大出力 Yb ファイバーレーザー開発の見込みが得られ、設計指針を明確とすることができた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご支援とご協力を頂いた眼科（寄付講座）の黒田寛人教授と米谷新教授に感謝いたします。また学内グラントの助成を頂き、審査員の先生方に感謝申し上げます。