

ナノ秒 Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの 温度特性評価

戸倉川研究室 増永真輝

1. 序論

レーザー加工の特徴は次のとおりである。(1)機械加工と異なり、非接触かつ反力なしに加工できるため、歪みを与えることなく高精度に加工することができる。(2)集光することにより、マイクロメートルオーダーの微小な加工ができる。(3)単位時間当たりのエネルギーが高いパルスレーザーを利用することにより、合金、ダイヤモンド、セラミックスなどの加工もできる。[1] 材料により吸収される波長は異なっており、半導体材料として用いられている Si や Ge は $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ に[2]、ポリマー材料や生体組織(水)は $2\ \mu\text{m}$ 帯に吸収を持っている[3]。中でも $2\ \mu\text{m}$ 帯のレーザーは医療への応用が多く、レーザーメスや生体組織のアブレーションといった技術が実用化されている[1]。

光ファイバーは数 μm から数十 μm のコアを屈折率の高いクラッドで覆った誘電体導波路の構造を取っており、ある程度曲げても光を伝搬させることができる。この利点から、ファイバーレーザーは比較的コンパクトなシステムを構成でき、レーザー微細加工や生物医学イメージング、分光などで日常的に使用されている[4]。しかし中赤外を透過するガラスは熱機械的に弱く[5]、高出力化が困難である。

パルス光はエネルギー密度が高く、レーザー加工ではより短いパルスが必要である[6]。Q スイッチはレーザーから強力な短いパルス発振を取り出すために用いられる手法[7]であり、共振器の Q 値を急激に変化させることによりエネルギー密度の高いパルスを得ることができる。

本論文では 1. 序論で研究背景、2. 原理ではレーザーの原理や本研究に関連する光ファイバーについて説明した。3. Q スイッチ発振実験では Tm ファイバーを用いた Q スイッチレーザーについて、冷却系を改善し出力の変化を評価、4. 増幅実験で先の Q スイッチレーザーを用いた増幅器を構成、冷却温度による特性の評価を行った。最後に 5. 結論を本研究の結論とした。

2. 原理

2.1 Q スイッチレーザー

Q スイッチはレーザーから強力な短いパルス発振を取り出すために用いられる手法[7]である。Q 値は共振器の良さの指数であり Q 値が低くなることは発振しきい値が高くなることを意味する。Q スイッチによる短パルスの発生過程を図 1 に示した。

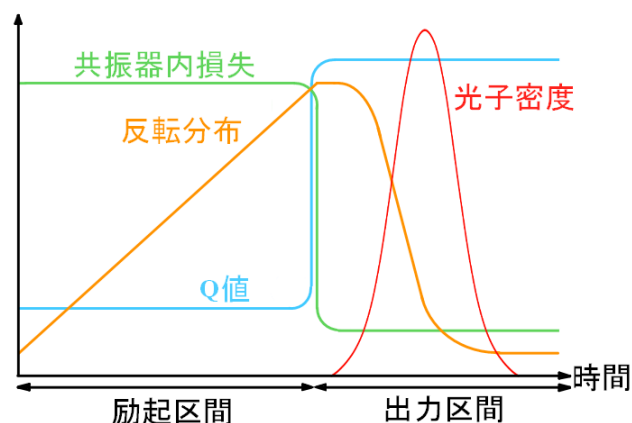


図 1 Q スイッチレーザーによる短パルスの発生過程

Q スイッチレーザーでは、はじめ Q 値を低くして励起をする(励起区間)。次に反転分布が最大に達した瞬間に Q 値を急激に元の高い状態に戻す(出力区間)。このとき反転分布は通常の閾値での反転分布よりも十分に高くなっているため、レーザー発振が急激に立ち上がる。以上の過程により得られる短パルスのピークは、通常のパルス発振の場合よりもはるかに高いので[8]材料加工や医療分野への応用が行われている。

2.2 ダブルクラッドファイバー

光ファイバーは一般的に高屈折領域(コア)と低屈折率領域(クラッド)の誘電体で形成される円柱形の導波路であり、全反射の繰り返しにより光をコア中に閉じ込めながら伝搬する光デバイス[9]である。以下、本研究で使用した光ファイバーについて説明する。

ステップインデックス型のダブルクラッドファイバーはクラッドの外側にさらに屈折率の低い第 2 クラッドが存在する。(図 2)

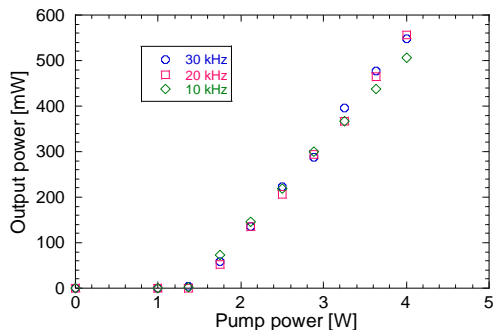


図 5 AOM の繰り返し周波数 10、20、30 kHz における共振器出力特性の比較

それぞれの繰り返し周波数により、出力特性に有意な差は無いことが分かった。パルスの安定化やピーク光強度による破壊を考慮し、以降の実験は AOM の繰り返し周波数を 20 kHz で固定して行った。

3.3 冷却系改善後の出力特性の変化の観察

熱による実験系の破損の対策で、利得ファイバーに冷却シートを張り付けた。冷却シートがあるときと無いときの出力特性の比較を次の図 6 に示した。最大の平均出力は励起パワー 3.6 W のときで、冷却シートなしのときが 466 mW、冷却シートありのときが 598 mW であった。スロープ効率は冷却シートなしのときが 21%、冷却シートありのときが 27% であった。また、しきい値は冷却シートなしのときが 1.5 W、冷却シートありのときが 1.4 W であった。

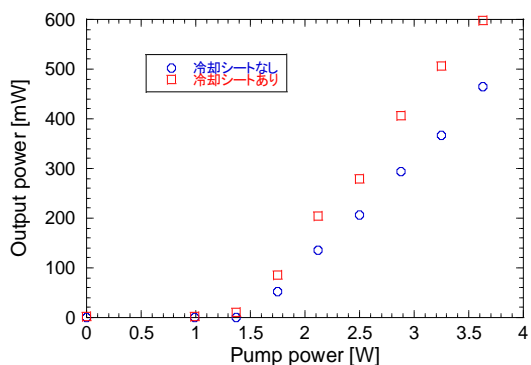


図 6 冷却シートによる冷却系の改善前後の出力特性の比較

よって冷却シートを張り付けて放熱の効率を上げることでスロープ効率が上がり、しきい値は下がることが分かった。Tm にはレーザー遷移のほかに熱を発生する非線形緩和過程が存在するため、冷却の効率を上げることで非線形緩和が減少、レーザー出力の効率が上がったと考えられる。

4. 増幅実験

4.1 実験方法

第 3 章の共振器に増幅用の Tm ファイバーを融着し、高出力 LD による増幅を行った。実験の構成図を図 7 に示した。

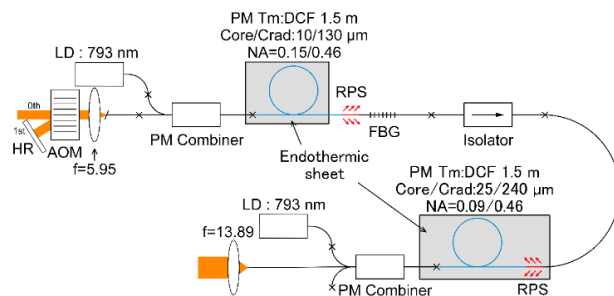


図 7 コア径 25 μm の Tm ファイバーを用いた増幅器の構成

利得ファイバーはアルミプレートの上に重なりが少なくなるように巻いて置き、上から冷却シートを張り付けた。アルミプレートの下にはペルチェ素子を用いた冷却システムがあり、増幅用利得ファイバーの冷却温度を管理できるようにした。共振器の利得ファイバーは LD により 5.9 W で励起した。なお、このときの発振器の平均出力は 954 mW である。

4.2 冷却温度による出力の変化の比較

増幅用の利得ファイバーを -10°C 、 -5°C 、 0°C 、 5°C に冷却し、出力特性の比較を行った。結果を次の図 8 に示した。増幅用 LD の出力に対するスロープ効率は 0°C が 34%、 -10°C 、 -5°C 、 5°C が 33% であった。最大の平均出力は増幅用 LD の励起パワー 14.8 W のときで、 -10°C 、 -5°C 、 0°C のときが 4.4 W、 5°C のときが 4.2 W であった。スロープ効率に有意な差は見られなかった。共振器の出力は冷却温度に依存するのに対し、増幅器の出力は冷却温度に依存しないことが分かった。

先行研究[10]により Tm ファイバーによる共振器では、利得ファイバーの冷却温度を下げることでパルスの中心波長が短波長側にシフトすることが分かっている。増幅用の Tm ファイバーは冷却されて誘導放出断面積が短波長側にシフトしたが、発振用の Tm ファイバーの冷却温度は室温であった。よって発振器から出力されたパルスの中心波長が一定であり、増幅器のスロープ効率が変化しなかったのではないかと考えられる。

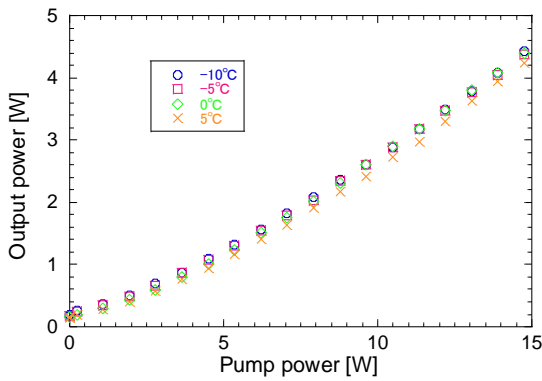


図 8 増幅用 Tm ファイバーの冷却温度による出力の変化の比較

-10°Cにおけるスペクトルを観察した結果を図 9 に示した。

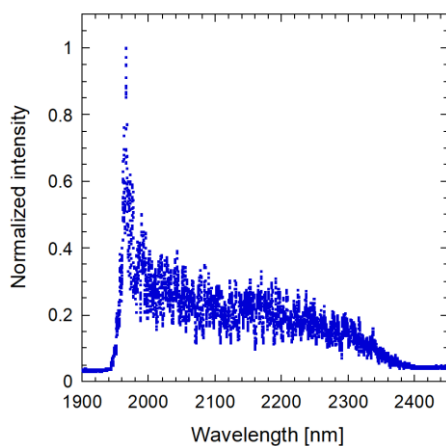


図 9 冷却温度-10°Cにおけるスペクトル波形

スペクトルは 1940 nm から 2400 nm 付近まで広がっており、スーパーコンティニューム(SC)光が発生していることが観測できた。1960 nm にピークが存在しており、FBG の中心波長と一致した。

原因は発振器出力が高く、ファイバー中で非線形光学効果が顕著になったためであると考えられる。よって発振器出力を下げることで SC 光の発生を抑えることができ、増幅効率の改善が見込まれる。

5. 結論

本研究ではまず、Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの冷却系を改善し、出力の変化を評価した。放熱効率の改善により励起パワーに対するスロープ効率が 21 % から 27 % に上昇した。次に、先のレーザーを増幅器に接続し、増幅用の利得ファイバーの冷却温度による特性を評価した。増幅用 Tm ファイバーの励起パワーに対するスロープ効率は冷却温度に対して変化がないこと

が分かった。これは、発振器の冷却温度が一定であったためだと考えられる。また発振器からの出力を増幅器に通すことで SC 光が発生することが分かった。発振器の出力が高く、非線形光学効果が顕著に現れたと考えられる。今後の展望については、SC 光を抑えてさらなる増幅を行い、高出力化を目指す。またこの光源を用いて加工実験を行っていく。

参考文献

- [1] 三沢 和彦, 芦原 聡 著, “工学系のためのレーザー物理入門”, 講談社
- [2] Zenon R. Szczepaniak and Bogdan A. Galwas, “Photo-devices for optical controlling of microwave circuits”, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, **3**, 86-94(2001)
- [3] Laura A. Sordillo, Sebastião Pratavieira, Yang Pu, Kaliris Salas-Ramirez, LinJyan Shi, Lin Zhang, Yury Budansky, R. R. Alfano, “Third therapeutic spectral window for deep tissue imaging”, *Proceedings of SPIE*, **8940**, 89400V-1 - 89400V-7(2014)
- [4] Simon Duval, Martin Bernier, Vincent Fortin, Jérôme Genest, Michel Piché, and Réal Vallée, “Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared”, *Optica*, **2**, 623-626(2015)
- [5] Yigit Ozan Aydin, Vincent Fortin, Frederic Maes, Frederic Jobin, Stuart D. Jackson, Real Vallee, and Martin Bernier, “Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency”, *Optica*, **4**, 235-238 (2017)
- [6] Joseph D. Miller, Mikhail N. Slipchenko, Josef Felver, and Sukesh Roy, “Generation of high-energy, Gaussian laser pulses with tunable duration from 100 picoseconds to 1 millisecond”, *Optics Express*, **28**, 37811-37826(2020)
- [7] ヤリーヴ・イェー 著, 多田 邦雄, 神谷 武志 監訳, 石川 卓哉, 板谷 太郎, 伊藤 文彦, 岡田 至崇, 鎌田 憲彦, 土屋 昌弘, 中野 義昭, 中林 隆志, 林 秀樹 共訳, “ヤリーヴ -イェー 光エレクトロニクス 基礎編”, 丸善出版
- [8] 霜田 光一 著, “レーザー物理入門”, 岩波書店
- [9] 山下 真司 著, “光ファイバ通信・計測のための 光エレクトロニクス”, 数理工学社
- [10] 高貫 広翔, 電気通信大学 令和 4 年度卒業論文