

# フッ化物ファイバへのグレーティングミラーの書込みと 3 $\mu\text{m}$ 波長帯レーザー光の増幅特性の評価

秋田県立大学 機械工学科  
助教 合谷 賢治

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018209-B2)

キーワード：中赤外光源，フッ化物ファイバ，フェムト秒レーザー加工，ブラッググレーティング

## 1. 研究の目的と背景

産業用のレーザー装置を波長毎に大別すると、X線から近赤外線、遠赤外線の光源が存在しているが、3 $\mu\text{m}$  付近の中赤外域波長の産業用光源が欠落している。3 $\mu\text{m}$  付近の波長帯は、水酸基 (OH 基) による強い吸収性を有しており、既存のレーザー装置とは異なる加工特性が得られる。例えば、図 1 のソーダガラスの透過スペクトルを見ると、(a)2.5 $\mu\text{m}$  以下と(b) 3 $\mu\text{m}$  付近、(c) 5 $\mu\text{m}$  以上の波長における吸収特性は顕著な違いが認められる。代表例として表面吸収が支配的な CO<sub>2</sub> レーザと比べると、3 $\mu\text{m}$  付近ではレーザー光のエネルギーが“程良く”吸収されるため、エネルギーの伝達効率や材料に加わる応力分布の制御がし易くなる。一般的にレーザー照射による温度分布と材料に加わる応力分布は相関があり、CO<sub>2</sub> レーザでは表面吸収 (図 2 a) に起因した急峻な応力分布が発生し、照射領域周辺が変形するため、加工精度の劣化や加工後の反りによる成功率の低下が生じる。一方で 3 $\mu\text{m}$  付近のレーザー光では、材料の厚さ方向に対して、緩やかに吸収 (図 2 b) されるため、加工対象の変形及び加工後の反り状態が軽減される。さらに材料の厚さ方向に対して効率的なエネルギー注入が可能である。この吸収特性の違いにより、材料によっては既存手法の加工効率の歩留りを大きく改善できると考えられるため、3 $\mu\text{m}$  帯レーザー光源は潜在的な用途が数多く存在する。また、レーザー加工の適用が難しかった材料の加工を可能になるかもしれない。加工用途の 3 $\mu\text{m}$  レーザの開発においては、フォノンエネルギーが小さく、波長 4 $\mu\text{m}$  まで透過帯域を持つフッ化物ガラスファイバが用いられている。しかし、加工用途の高出力 3 $\mu\text{m}$  帯光源の開発は、レー

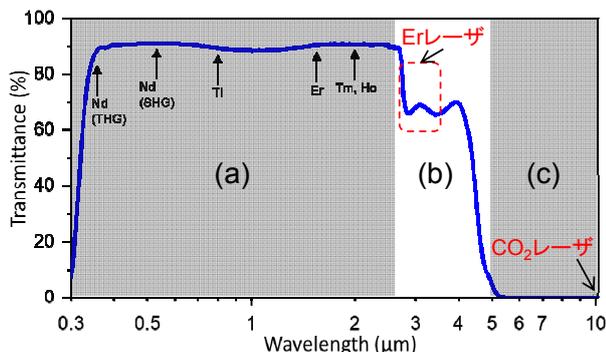


図 1 ソーダガラス 0.6mm の透過スペクトル

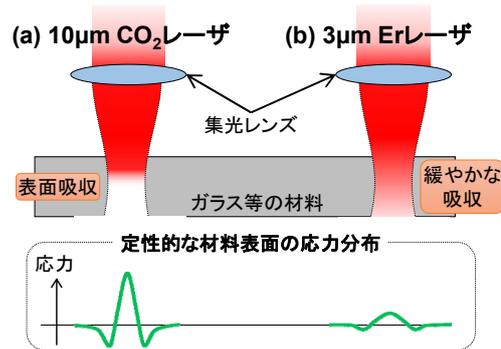


図 2 レーザ光吸収特性の違いと応力分布

ザ媒質であるフッ化物ガラスの加工難度の高さにより未成熟の分野である。このフッ化物ファイバは、石英ガラスファイバと比べると、材料特性が大きく異なり、端面処理や融着といった一般的な加工処理が難しく、十分な技術水準に達していない。また、ファイバレーザにおいては一般的に用いられている、ファイバブラッググレーティング (FBG) ミラーの作製技術も実用性能には到達していない。このうち、FBG はレーザーの発振効率と発振波長を直接的に決定づける重要な要素技術である。先行研究[1]ではフッ化物ファイバへの FBG の作製実現性が述べられているが、十分な性能評価と最適化が行われていなかったため、本研究では FBG の性能評価手法について報告する。

## 2. フェムト秒レーザーによる FBG 描画

フェムト秒レーザーは、非熱的なプロセスで加工対象を改質することが可能である。発振されるパルス光の立ち上がり幅が材料の熱拡散時間 (数ピコ秒) よりも十分に短く、熱的プロセスによる加工を利用した場合に比べて、熔融ムラやバリなどによる不均一さを極限まで軽減する。また、パルス幅が短いことから、単位時間当たりのピーク強度が非常に高く、エネルギーを多光子過程によって材料に供給するため、あらゆる材料を改質し、その加工領域を回折限界以下に制限することも可能である。光ファイバのように機械加工が難しい材料に対しては、無類の加工性能を発揮する。本研究では、屈折率変調領域からなる FBG をフッ化物ファイバ導波路中に描画し、その性能評価を行う。本手法の特徴は、逐次描画法により屈折率変調領域を作製することで反射波長や反射率の調整が容易であることと、レー

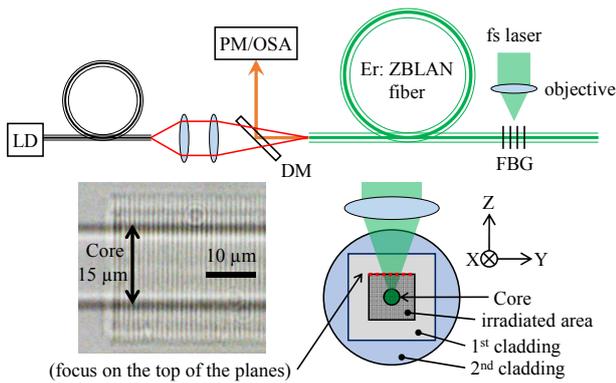


図3 加工システムの模式図

ザ発振特性の評価が加工中のインプロセスで可能な点である。図3は、加工システムの模式図を示しており、FBG 描画中に発振波長とレーザ出力を観察することが可能である。また、励起用 LD の代わりに広帯域な中赤外光源を配置すれば、FBG 描画中に反射波長や反射率の経時変化を観察することもできる。図4は実際に中赤外光源（スーパーコンティニューム光源、SCL）を用いて、測定した反射波長と反射率だが、FBG の描画長さ（グレーティング長＝グレーティングの厚み×描画ピッチ）が3.0mmで反射率  $R > 97\%$  を達成している。この反射率の実測値とブラッグ条件を比較すれば、屈折率変調量を正確に推定することができ、本実験においては、変調量が  $1.1 \times 10^{-3}$  であることを確認した。さらに、この変調量を用いると、伝搬光に対するミー散乱の程度を定性的に推定することができるため、用いるレーザ発振器や実験系における最適な屈折率変調量を決定づけることも可能である。例えば、フェムト秒レーザの照射フルエンス  $F = 25 \text{ J/cm}^2$  と  $40 \text{ J/cm}^2$  でFBG 描画を行うと、変調量は  $0.7 \times 10^{-3}$  と  $1.1 \times 10^{-3}$  と算出できる[2]。このときのFBG 描画に伴う実測した伝送損失は、発振波長  $2799.5 \text{ nm}$  のとき、 $< 0.05 \text{ dB}$  と  $< 0.5 \text{ dB}$  であることを確認した。この結果から、より高い発振効率を得るためには  $F = 25 \text{ J/cm}^2$  を用いればよいことがわかる。

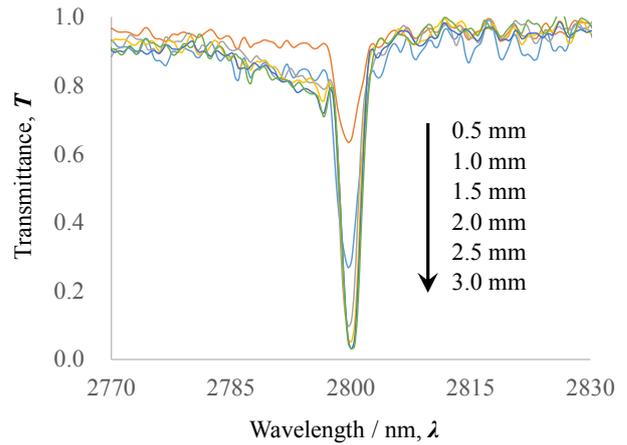


図4 グレーティング長毎のFBG 反射率

### 3. レーザのインプロセス観察

図4にFBG 描画中の発振波長と特徴点における発振スペクトルを示す。実験は波長  $2799.5 \text{ nm}$  付近にレーザ発振波長が固定されるように描画ピッチを設定した。また、励起用 LD の出力は  $2 \text{ W}$  に固定した。グラフは、縦軸がピーク波長、横軸がグレーティング長  $L$  である。グレーティング長が  $0.3 \text{ mm}$  以下の領域ではピーク波長が広範囲で変動していることがわかる。 $L = 0.0 \text{ mm}$  の発振スペクトルを見ると、ASE（自然放射増幅光）になっており、発振波長が固定されていないことがわかる。一方で、 $L = 0.6 \text{ mm}$  以降はピーク波長が  $2799.7 \text{ nm}$  付近に固定されているように見えるが、実際は  $L = 1.5 \text{ mm}$  の波長スペクトルのようにレーザ発振と微弱な ASE 光が混在しているような状態である。また、発振波長は反射率の増加とともに長波長側へと段階的にシフトしている様子が確認できる。これは、FBG 反射率が上昇しレーザ媒質内の閉じ込めが強くなるにつれて、励起強度が増加していることに起因する。最終的に  $L = 2.5 \text{ mm}$  以降は、ASE 光は確認できず、安定したレーザ発振が得られるようになる[3]。

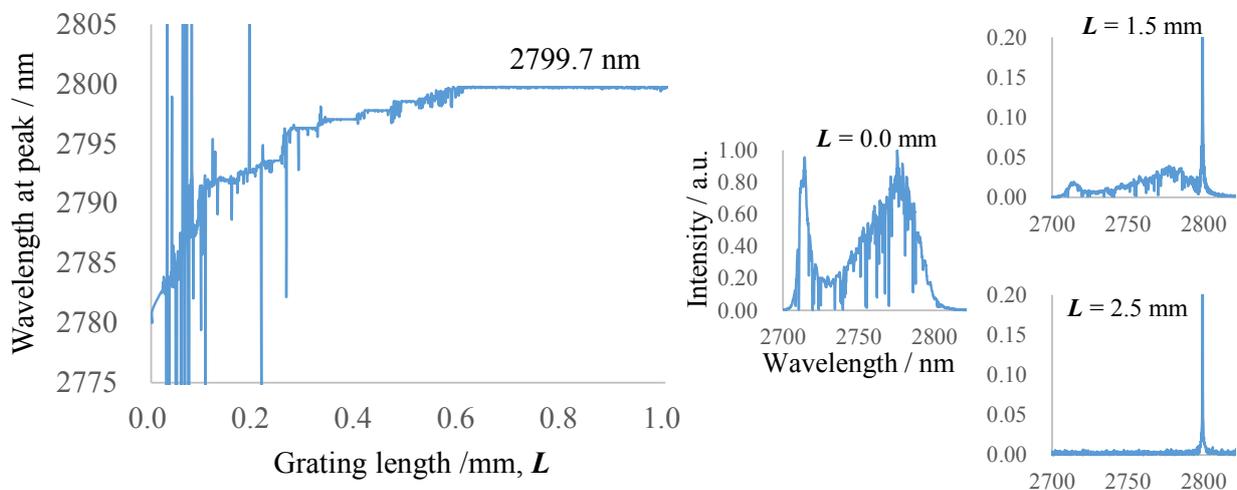


図5 FBG 描画中の発振波長変化の様子

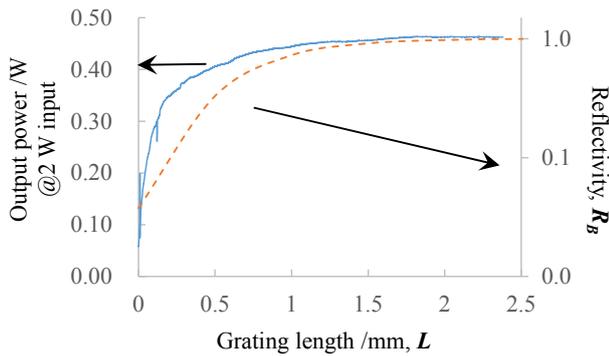


図6 レーザ出力とFBG反射率の変化の様子

さらに、レーザ出力のインプロセス中の観察結果を図5に示す。グラフより、グレーティング長が大きくなるにつれて、対数関数的にレーザ出力が増加することが確認された。図中の破線は反射率を対数表示で示しており、反射率の増加に伴ってレーザ出力が増加していることが認められる。

#### 4. FBGの温度特性

作製したFBGについて、実用性能を評価するために温度特性を評価した。使用したフッ化物ファイバの材料のガラス転移温度はおよそ265°C、軟化点はおよそ295°Cである。図7は、レーザ発振中のFBG近傍を温調装置により加熱した際の温度特性グラフである。図7(a)は平均出力、(b)は発振波長を示す。加熱を開始し、90°C付近から平均出力は減少し、軟化点付近の290°C付近で急下降していることがわかる。また、発振波長については、加熱開始から長波長側へ変化し、ガラス転移温度付近の260°Cで大きく変化していることがわかる。260°Cまでの近似直線から波長安定性を算出すると、15.9pm/°Cであり、非常に安定的なFBGであるといえる。

海外の先行研究[4]と比較すると、Bernierらの実験では、125°Cに加熱した時点で屈折率変調量は50%以上減少することが確認されている。一方、本実験で作製したFBGは125°Cでは、75%までの減少にとどまっており、より熱耐久性に優れているといえる。この違いは、フェムト秒レーザで屈折率変調領域を形成させる際の照射フルエンスの違いに起因しており、本手法による屈折率変調量の最適化が頑健なレーザ発振器の実現に効果的であるといえる。

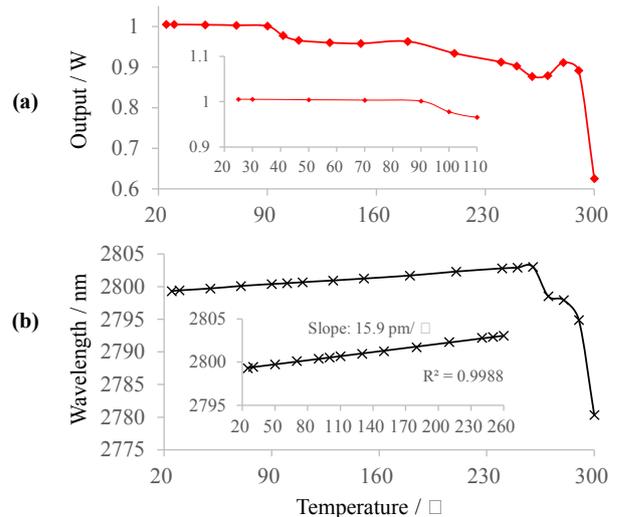


図7 FBGの温度特性

#### 6. 高出力レーザ発振器の試作

本手法を用いて作製したFBGを利用した高出力レーザ発振器の評価を行った。予備実験では、レーザ出力5Wで連続発振時間2000時間を達成している。用いた発振器は図8のように構成され、Er添加フッ化物ファイバの両端に反射率の異なるFBGが付与されている。高い反射率を有するFBGをHR-FBG、低い反射率のFBGをLR-FBGとして、それぞれ全反射ミラーと部分反射ミラーとして機能させた。

本実験では、レーザ発振効率(発振出力/励起出力)と、出力安定性、波長安定性を評価した。図9に示すように本構成により、波長2838nmにて最大出力35.4Wが得られ、世界最高クラスの中赤外3μm光源を実証した。高出力側における発振効率は15%程度であり、想定していたよりも発振効率は低い結果となった。また、HR-FBGにおけるレーザ光(2838nm)の透過率を観察したところ、実験中においては大きな変動がないことを確認した。この透過率が増加してしまう場合、レーザ発振中にFBGが加熱され、屈折率変調量が減少していることを示すが、本実験ではそのような現象は確認されなかった。図10に示される波長安定性(実験構成の都合で出力21.8W以下)については、どのレーザ出力においても2838nmで発振しており、安定したレーザ発振が得られた。

つづいて、長時間計測により出力安定性を評価した結果

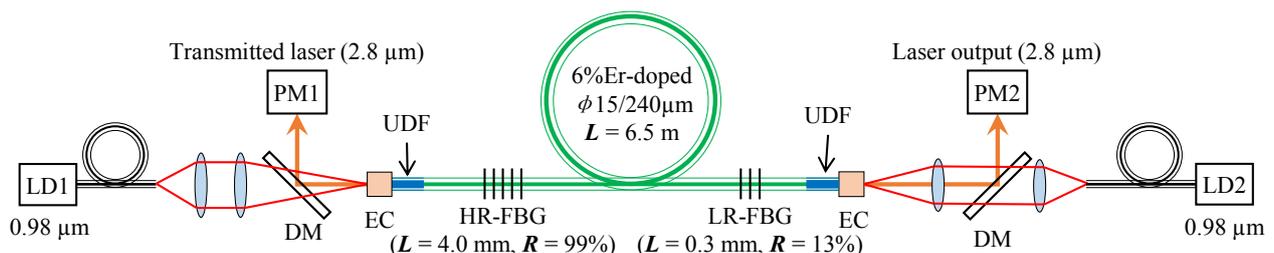


図8 高出力レーザ発振器の模式図

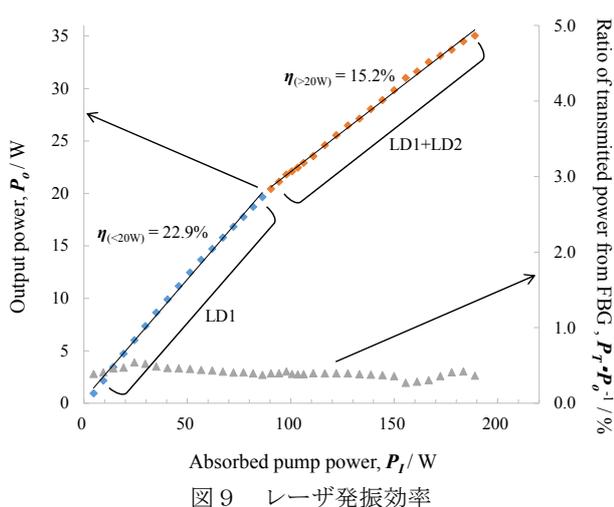


図9 レーザ発振効率

を 図 1 1 に 示 す 。 出 力 19W と 30W に お け る 出 力 安 定 性 を 観 察 し た と ころ 、 少 なく とも 60 分 間 の 発 振 実 験 で は 出 力 の 変 動 は 全 く 見 ら れ ず 、 出 力 30W の 60 分 間 試 験 の あ と に 35W の 長 時 間 試 験 を 行 う 際 に 励 起 用 LD1 に 接 続 さ れ て い る 石 英 フ ァ イ バ が 損 傷 し 、 実 験 を 終 了 さ せ た 。 し か し 、 3 $\mu$ m 帯 レーザ に お い て 、 出 力 30W を 超 え る 長 時 間 発 振 実 験 で は 、 世 界 最 高 記 録 の 結 果 [5] が 得 ら れ た 。 以 上 の 結 果 か ら 、 発 振 器 全 体 と し て は 、 発 振 効 率 や 周 辺 素 子 の 耐 性 に つ い て は 課 題 が 残 る も の の 、 作 製 し た FBG に つ い て は 、 実 用 性 能 を 充 た し て い る と 判 断 し た 。

### 5. まとめ

フェムト秒レーザーの高い加工再現性と局所的改質能力を利用して実現される加工性能を FBG 描画技術に活用し、FBG の性能評価手法を開発した。本手法により最適化された FBG は、出力安定性、波長安定性といった実用性能を十分に満たしており、実用上の課題は解決していると結論付ける。また、将来的な高出力発振器の実証実験において、FBG ミラーのカスタマイズが必要になった場合にお

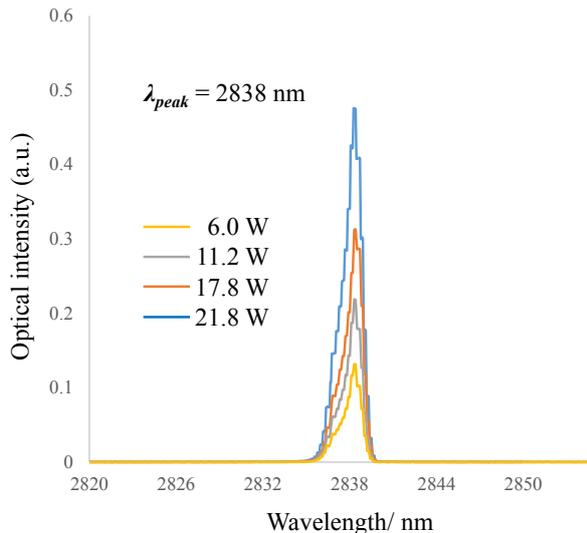


図10 レーザ出力毎の発振波長

いても、本手法により最適化することで想定される課題は解決可能であると考えられる。

### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成のご支援を受けて実施しました。深く感謝いたします。また共同研究者である大阪大学レーザー科学研究所 准教授 時田茂樹氏、核融合科学研究所 上原日和氏、三ツ星ダイヤモンド工業 村上政直氏に感謝します。

### 参考文献

- [1] 時田茂樹, 天田財団報告書 AF-2013214.
- [2] K. Goya, et al., Proc. SPIE 1089919, 2019.
- [3] K. Goya, et al., Opt. Express 26, 33305, 2018.
- [4] M. Bernier, et al., Opt. Lett., 32, 455, 2007.
- [5] K. Goya, et al., Appl. Phys. Express 12, 102007, 2019.

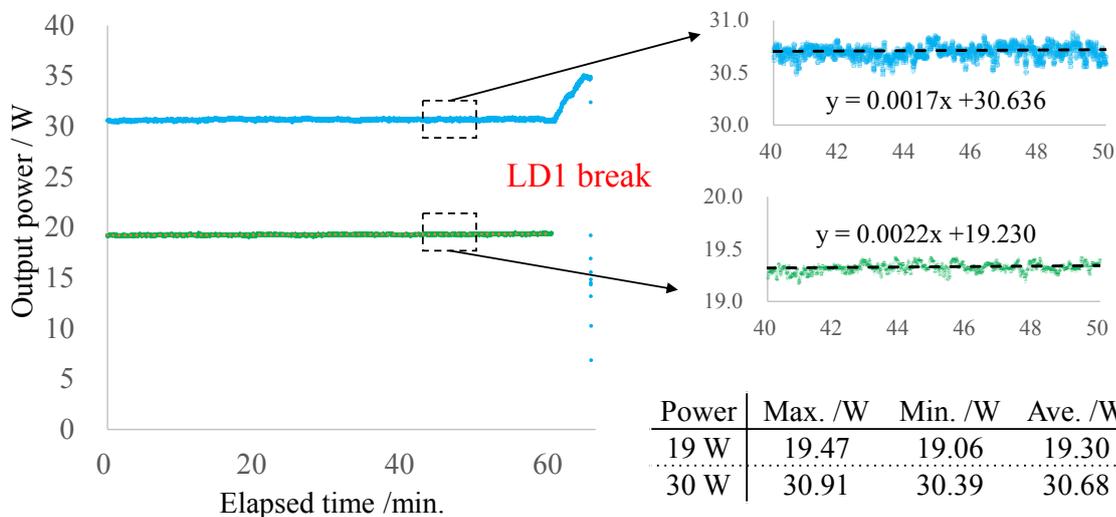


図11 出力19Wと30Wにおける出力安定性