

高出力 2 μm 超短パルスレーザー光源の開発

自然科学研究機構 分子科学研究所

助教 野村 雄高

(平成 27 年度 一般研究開発女性 AF-20150207)

キーワード：超短パルス、ファイバーレーザー、赤外光源

1. 研究の目的と背景

近年、新たな波長域における加工用の光源として、ツリウム添加ファイバーレーザーが注目されている。ツリウム添加ファイバーレーザーは、波長 2 μm 近傍で発振する高出力光源として有力であるが、この光は従来の加工用光源の光よりも波長が長く、加工材料に対する光の透過率などの性質が変わってくるため、従来の光では難しかったり不可能だった加工が可能になると期待される。たとえば、半導体材料のシリコンやゲルマニウムなどは可視・近赤外領域の光は透過しないが 2 μm 近傍の光は透過するため、これらの材質の裏側に別の物質を直接溶融接合させたり、材質内部に構造を直接書き込んだりすることができる。また逆に、従来の光に対しては透明度が高すぎてあまり吸収されず加工が難しかったプラスチック材料や有機物質などについて、比較的よく吸収されるために従来よりも効率よく加工できると期待される。このように、新たな波長の光を高出力で発生できるツリウム添加ファイバーレーザーは、加工の可能性を広げる光源として非常に有力である。

ツリウム添加ファイバーレーザーのもう一つの重要な特徴は、その広い蛍光スペクトルである。この蛍光スペクトルは波長にして数百 nm に渡って広がっているため、時間幅が 1 ピコ秒を切るようなフェムト秒超短パルス光を発生させることが可能である。このような超短パルス光を加工に用いた場合、熱が材料内を拡散する時間がないため余計な材料の融解が生じず、また非線形光学過程を利用することにより物質と相互作用する領域、すなわち加工する領域を精密に制御することができるため、より高品質な加工が可能となる。

これを踏まえて我々のグループでは、ツリウム添加ファイバーレーザーによる超短パルス光源の開発を進めてきた。これまでの研究では、ツリウム添加 ZBLAN ファイバーとよばれるフッ化物ファイバーを用いてレーザー発振器を開発し、時間幅が 50 フェムト秒を切るような超短パルスの発生に成功している。その一方で、出力パワーは 36 mW、パルスエネルギーにして 0.5 nJ 程度に限定されており、加工用途に用いるにはさらなる高出力化が必要となる。本報告では、この発振器からの出力パルスを増幅するためのシステムの開発について報告する。

2. 実験方法

2.1 チャープ・パルス増幅器の開発

これまでの研究で、時間幅 41 フェムト秒のパルス光を平均出力 36 mW で発生させることのできるようなレーザー発振器を開発していた。この出力をさらに増幅するための、チャープ・パルス増幅システムを開発した。すなわち、ストレッチャー、増幅器、コンプレッサーの 3 つから構成されるシステムを開発した。

このシステムを開発する際に、ZBLAN と呼ばれるフッ化物を材質としたファイバーを用いた。ZBLAN は $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ という 5 種類のフッ化物を組み合わせた組成から成るフッ化物ガラスであり、特に中赤外領域において吸収が少ないことで知られているほか、物質分散も小さいため、超短パルスの発生にも有効である。また、ZBLAN は石英に比べてフォノンエネルギーが小さい

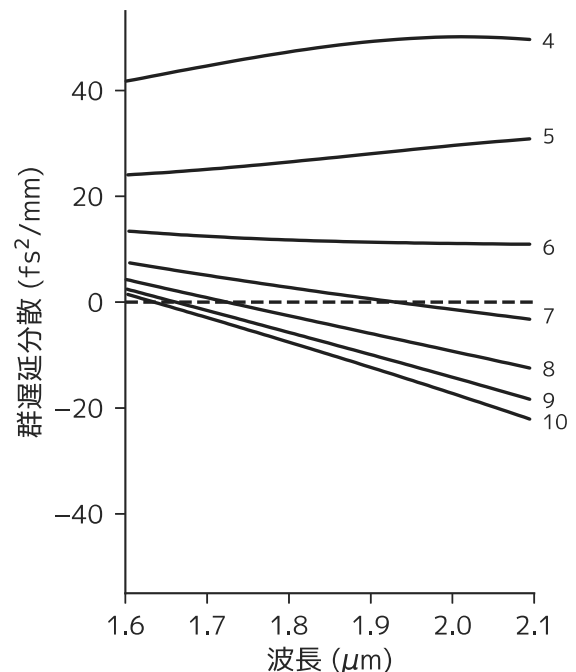


図 1: コア径を変えた際の ZBLAN ファイバーの総分散の変化の様子。各グラフの脇の数字はコア径 (単位は μm)。

ため、励起準位の寿命が長くなり、結果としてレーザー媒質として用いた際の効率が向上することが期待できる。

ストレッチャーとしては、正分散を与えるための光学系として回折格子と球面鏡を用いた系を用いるのが一般的であるが、調整が難しく透過効率も低いため、代替手段として正の分散を与える媒質を用いることを検討した。この際、通常石英ファイバーは波長 $2\ \mu\text{m}$ 近傍では総分散が負となるため、今回の用途には使用できない。一方、ZBLAN ファイバーであればもとの物質分散の絶対値が小さいため、図 1 に示すように、コア径を調整することで総分散を正から負まで広い範囲で制御することが比較的簡単に実現できる。図から、コア径が小さいほうが正の分散が大きくなることがわかるが、コア径を小さくしすぎるとファイバーへの結合が難しくなり、結合効率が落ちることが予想されるため、コア径が $5\ \mu\text{m}$ の ZBLAN ファイバーを用いることにした。このファイバーを全部で 15 m 用意し、この中に発振器からの出力パルスを通すことにより、パルス幅を 25 ps 程度まで伸長した。

その後、この光を増幅するため、コア径 $32\ \mu\text{m}$ 、第一クラッド径 $200\ \mu\text{m}$ のトリウム添加ダブルクラッド ZBLAN ファイバーのコアに入射した。このファイバーのコアの NA は 0.08 と比較的小さめであるため、低次の横モードだけが効率よく伝搬でき、コア径が大きくても比較的ビームプロファイルが綺麗になると期待される。なお、入射時のビームの平均パワーは 12 mW であった。励起光源としては波長 793 nm のマルチモードファイバー出力の LD を用い、シードパルスの反対側の端面からファイバーのクラッドに入射結合させた。この際、熱によるファイバーの損傷が問題となったため、励起光側の端面に無添加ダブルクラッドファイバーを融着することで熱問題の緩和を試みた。

この後、増幅用ファイバーから出力されたパルスを、刻線 560 本/mm の透過型回折格子対を用いたコンプレッサー

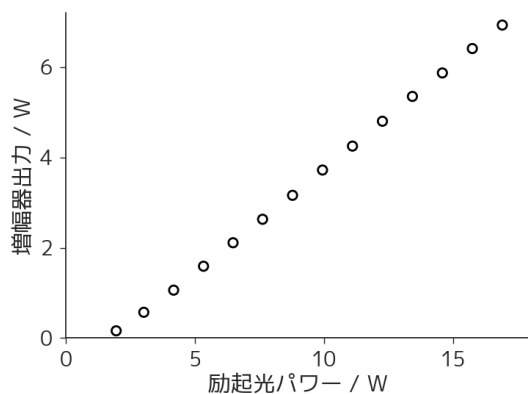


図 2: 励起用レーザーダイオードの出力に対する増幅器の出力パワーの推移。

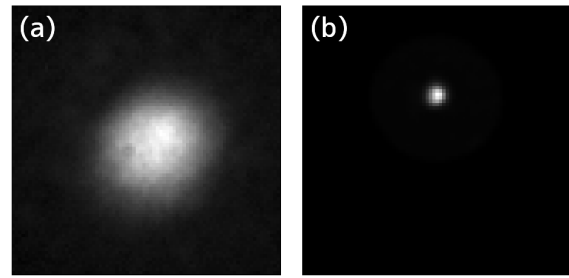


図 3: 増幅器の出力ビームプロファイルをそれぞれ(a)集光前および(b)集光後に測定したもの。

ーに通すことで圧縮した。このコンプレッサーの透過効率は~66%であった。

励起用 LD の励起パワーに対する、増幅器の出力パワーを図 2 に示す。入射した励起光のパワーが 17 W の時、パルス圧縮前の出力として 6.9 W が得られた。

この際のビームプロファイルを図 3 に示す。図 3(a)は集光前のビームであり、図 3(b)は集光後のビームであるが、いずれも綺麗な円形であり、NA の低いファイバーを用いた効果が出ていることがわかる。

また、測定された出力スペクトルを図 4 に示す。シード光のスペクトルが 1700–2100 nm の範囲で広がっていたのに比べ、かなり狭くなってしまった。スペクトル幅が狭まった要因としては 2 つ考えられる。1 つはゲインナロウイングが生じた可能性であり、もう 1 つはトリウムイオンによって短波長領域が吸収されてしまったという可能性がある。それでも、増幅後のスペクトルは幅 100 nm 以上に渡って広がっており、超短パルス発生には十分であると考えられる。

このパルス幅が実際にどの程度になっているかを調べるため、増幅器の出力パルスについてコンプレッサーを通した後、周波数分解光ゲート法 (FROG 法) による測定を

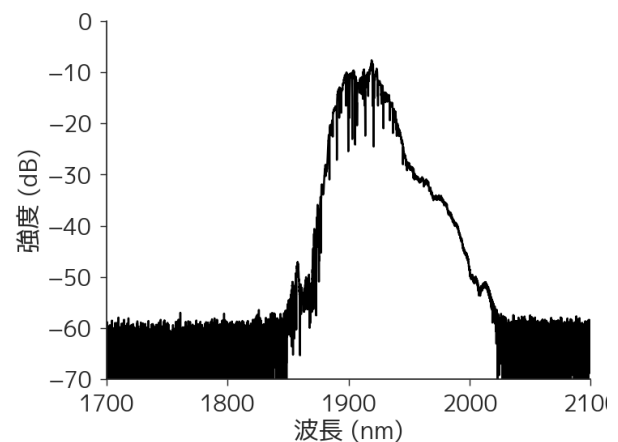


図 4: 増幅器の出力スペクトル。

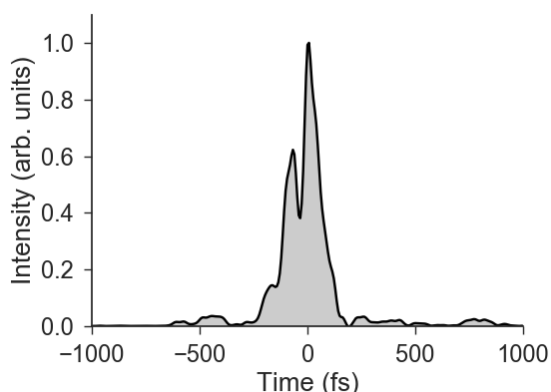


図 5: FROG 測定によって得られたパルス波形。

行った。このデータを解析することによって得られたパルス波形を図 5 に示す。このパルス幅は 150 フェムト秒となっており、増幅後の出力も超短パルスとなっていることがわかる。従来のツリウム添加石英ファイバーによる増幅器において、これまでの報告で最短のパルス幅は 256 フェムト秒であり、これに比較してかなり短いパルスが得られたと言える。また、圧縮後の平均パワーは 3.9 W となっているが、これはパルスエネルギーにして 58 nJ に相当する。

2・2 ZBLAN ファイバーによる高効率増幅

ZBLAN ファイバーを用いた場合の効率を石英ファイバーを用いた場合と比較するため、増幅器に用いていたダブルクラッド ZBLAN ファイバーを同等のパラメーターを持つダブルクラッド石英ファイバーと交換し、同様に増幅実験を行った。その結果、図 6 のように、石英ファイバーを用いた場合、ZBLAN ファイバーを用いた場合に比べてはるかに増幅効率が低くなることがわかった。

過去の石英ファイバーを用いた実験の文献値を調べると、文献によって効率が大きく異なっており、増幅器に入れる前のシード光の強度に効率が強く依存することが予想されたため、シード光の出力を強くして再度増幅実験を行うことにした。具体的には、シード光源をハイパワーのオシレーターに置き換えることで、増幅前のパワーを 5 倍程度に引き上げることができた。この高出力のシード光を用いた場合の結果 (図 6: 強シード) を見ると、確かに増幅効率が向上していることがわかる。

これらの観察結果については、ZBLAN と石英のフォノンエネルギーの違いで説明できる。ツリウム添加石英ファイバーにおいて、励起状態に上がった電子は、マルチフォノン緩和または自然放射によって基底状態に戻ってくることになる。この際、石英は比較的フォノンエネルギーが大きいいためマルチフォノン緩和が起きやすく、シード光を入射しない場合 9 割以上の電子がマルチフォノン緩和によって基底状態に戻るようになる。すなわち、誘導放射が

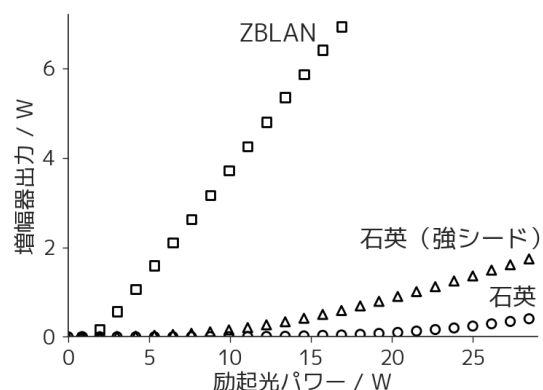


図 6: ZBLAN ファイバーと石英ファイバーを用いた場合の増幅効率の比較。

マルチフォノン緩和との競合になるため、効率よく増幅するためにはシード光を強くする必要があります。また、マルチフォノン緩和が強いために寿命が非常に短くなるので、反転分布を維持するために励起パワーも非常に強くする必要があります。すなわち、ツリウム添加石英ファイバーにおいて効率よく増幅するためには、シード光と励起光の両方を強くする必要があります。これに対し、ZBLAN ではフォノンエネルギーが小さいためマルチフォノン緩和の次数が高くなり、結果としてこの過程の起きる確率が著しく小さくなるため、実質的にマルチフォノン緩和を無視することができる。これは、反転分布の形成においては励起光強度が比較的低くても構わないことを意味し、誘導放出においてはシード光が弱くても構わないことを意味する。すなわち、ZBLAN ファイバーを用いた場合、シード光や励起光の強度が低くても効率よく増幅できると言える。ただし、本研究よりもはるかに高いパワー、たとえば数百ワットの励起光を用いた場合には、石英ファイバーの場合でも同等のスロープ効率が得られる。

以上の結果をまとめると、数ワット程度のパワーにおいては、ZBLAN ファイバーを用いることで非常に効率のよい増幅が可能になるということになる。数ワットの出力は多くの応用にとって十分な出力であり、これらの応用にとって ZBLAN ファイバーを用いた増幅が有力な選択肢となりうることを示せたと言える。

2・3 増幅器内非線形効果を用いた超短パルス増幅

上記のチャープ・パルス増幅システムでは、増幅時にスペクトル幅が狭くなってしまい、短いパルス幅を維持したまま増幅するのが難しかった。この原因については 2・1 節でも述べたが、ゲインナロウイングおよびツリウムイオンによる吸収が考えられる。

ツリウムイオンによる再吸収を抑制するには、反転分布の形成度合いをより強くしてやる必要がある。このために

は、ファイバーに励起光を強く吸収させる必要があるが、一般的なダブルクラッドファイバーを用いたクラッド励起ではこれを実現するのが難しい。そこで、ビーム品質のよいシングルモード出力の波長 $1.6 \mu\text{m}$ の励起光源を用意し、これを増幅用のツリウム添加ファイバーのコアに直接入射してコア励起を行うことで、強励起を試みた。

また、ゲインナロウイングへの対抗策として、ファイバー内での非線形効果を利用したスペクトル拡張を試みた。具体的には、ストレッチャーおよびコンプレッサーを取り除くことでチャープ・パルス増幅をやめ、増幅器内でのパルス幅をある程度短くし、ピーク強度が高くなるようにした。これにより、増幅器内において自己位相変調などの非線形効果を起こさせ、それを利用することでスペクトルの拡張を試みた。

このような系において増幅を行った際の、スペクトルの変化の様子を図7に示す。励起パワーを上げるにつれてスペクトルが広がっていく様子が明確に見て取れる。これは、増幅ファイバー内で自己位相変調が起きたためと考えられる。これらのパルス形状をFROG法で測定していくと、スペクトルが広がるにつれ、パルス幅が短くなっていくことがわかった。励起光強度が 13 W の時の出力をFROG法によって測定し、それを解析することによって得られたパルス波形を図8に示す。このパルスの時間幅は 48 フェムト秒 となっており、レーザー発振器からの出力と同程度の時間幅を持つパルスが得られていることがわかる。また、この時の出力パワーは 2.5 W であった。特筆すべき点として、これらの測定においてコンプレッサーを使用していないことが挙げられる。すなわち、増幅ファイバーから直接超短パルスが出力されていることになる。このため、コンプレッサーによるロスがないのはもちろん、光学系も単純になり、チャープ・パルス増幅システムよりも取り扱いがより簡単なシステムとなっていると言える。出力パワー自体はチャープ・パルス増幅システムのものよりもやや劣るが、パルス幅は約 $1/3$ となっており、ピークパワーはより高くすることができた。

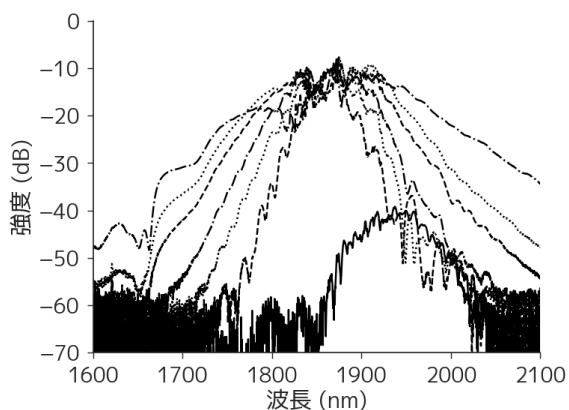


図7: 励起光強度を上げていった際のスペクトルの変化の様子。

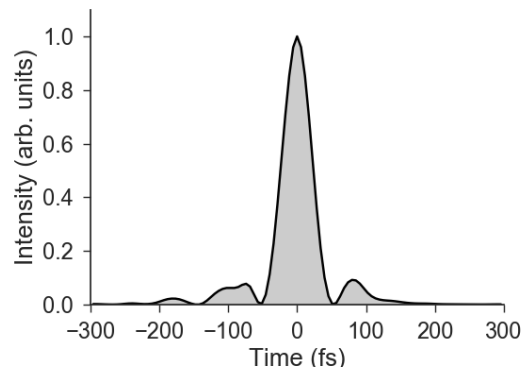


図8: FROG法での測定結果を解析することによって得られたパルス波形。

3. まとめ

ツリウム添加 ZBLAN ファイバーを用いて、波長 $2 \mu\text{m}$ 帯における超短パルスレーザー増幅器を開発した。

通常のチャープ・パルス増幅システムを開発することにより、平均出力 3.9 W 、パルス幅 150 フェムト秒 のパルス列を繰り返し周波数 67.5 MHz で得ることができた。さらに、この出力を石英ファイバー増幅器と比較した結果、ZBLAN を用いれば数ワット程度の出力であれば非常に効率よく増幅できることが分かった。これは、応用にとっては十分な出力であり、たとえば透明なプラスチックの加工などに用いることのできる効率のよい光源として利用できると期待される。

また、あえてチャープ・パルス増幅をやめ、増幅ファイバー内の非線形効果を利用することで、増幅後においてもスペクトル幅を非常に広くすることができ、時間幅 48 フェムト秒 という非常に短いパルスを実出力 2.5 W で得ることができた。

この光源は、超短パルス性を利用した精密加工や、非線形吸収を用いた特殊加工などにつながるものと期待している。

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行われました。また、ファイバーラボ株式会社の三村榮紀氏、小川和彦氏には、フッ化物ファイバーのご提供および有益なご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Yutaka Nomura and Takao Fuji, "Efficient chirped-pulse amplification based on thulium-doped ZBLAN fibers," Appl. Phys Express **10**, 012703 (2017).
- 2) Yutaka Nomura and Takao Fuji, "Generation of watt-class, sub-50 fs pulses through nonlinear spectral broadening within a thulium-doped fiber amplifier," Opt. Express **25**, 13691 (2017).