

ファイバーレーザーの進展と応用

西澤典彦

Development and Application of Fiber Laser

Norihiko NISHIZAWA

Fiber laser, which uses optical fiber as gain medium, has high heat radiation and excitation efficiencies, and it has achieved great advance as compact, maintenance free, and practical laser. In this review paper, the recent trend and future prospect of fiber laser are discussed in terms of their advance, applications, and comparison with other lasers.

Key words: fiber laser, fiber amplifier, high power laser, pulse laser, laser application

ルビーを用いてレーザーが発明されてから 50 数年になる。それ以来、レーザーはさまざまな応用技術を創出し、また科学技術の発展にも多大な貢献をし続けてきた。そして最近では、ファイバーレーザーの技術が大きく進展し、レーザーとその応用分野を牽引するようになってきた。

ファイバーレーザーは、光ファイバーを増幅媒質として用いたレーザーである。ファイバーレーザーの歴史は意外に古く、1960 年代にはガラスレーザーをファイバー化したものが発振していた¹⁾。このときはまだクラッドがなく、あまりよい特性は得られなかった。その後、光ファイバー通信技術の研究開発において光ファイバーの低損失化が進み、約 25 年前に Er 添加ファイバーが²⁾、そしてそのすぐ後に、半導体レーザー励起の小型な Er 添加ファイバー増幅器 (EDFA) の開発が実現され³⁾、EDFA の開発と実用化が加速していった。

当時は、ファイバーレーザーの出力はまだ小さく、光通信やセンサー用の光源としての研究が主流であった。しかし、光通信技術の成熟とともに各種デバイスの性能が向上し、2000 年ごろの小型な超短パルスファイバーレーザーと加工用高出力ファイバーレーザーの製品化によって、ファイバーレーザーに対する注目度が上がり始めた。今日では、レーザー加工などに活用される、最も高出力が得られるレーザーのひとつとなり、また、フォトニック結晶ファイバーなどを活用した最先端レーザーとしても活躍

している。

本稿では、ファイバーレーザーの原理や特徴から、最新動向までを概説する。またその他の種類のレーザーとの比較も交えながら、将来展望について解説する。

1. ファイバーレーザーの原理・基本構成

ファイバーレーザーは、成熟してきた光ファイバーの技術に支えられている。一般に、光ファイバーは高純度な熔融石英を材料とし、直径 $\sim 10 \mu\text{m}$ のコアを、屈折率が若干低いクラッドが囲った構造になっている。光はコアとクラッドの境界を全反射しながら進んでいく。光ファイバーは非常に損失が低く、長距離光通信で用いられる波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯では、損失 0.18 dB/km (20 km 伝搬して光強度が約半分になる) が実現されている。光デバイス全般からみても、驚異的に低損失なデバイスである。このような光ファイバーに、Er や Yb などの希土類を添加すると、光ファイバー中で光を増幅できる、光ファイバー増幅器を構成することができる。

図 1 は、代表的な希土類添加ファイバー増幅器の利得スペクトルを表している。光通信で用いられている $1.55 \mu\text{m}$ 帯の Er や、最も高い出力が得られている $1.06 \mu\text{m}$ 帯の Yb を添加したファイバー、そしてそれらを共添加したファイバーが、おもに製品で活用されている。このほかに、波長 $0.95 \mu\text{m}$ 帯の Nd、 $1.9 \mu\text{m}$ 帯の Tm や、短波長帯に利得をも

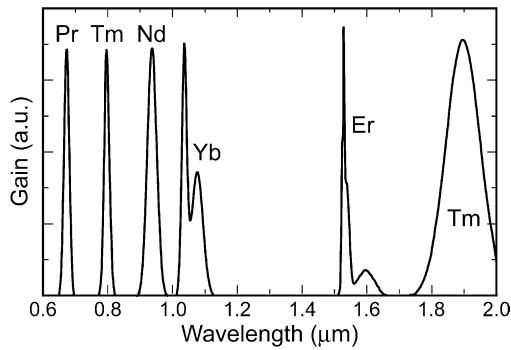


図1 代表的な希土類添加ファイバーの利得スペクトル。

つ Pr 添加ファイバーなどが開発されている。用途に合わせて添加濃度や分散特性などを変化させたものが開発されている。

このような光ファイバー増幅器を用いて共振器を構成し、励起光源を繋ぐことで、ファイバーレーザーを構築することができる。ファイバーレーザーの基本構成を図2に示す。ファイバーデバイスの接続も、融着接続機を用いることで、通常の光ファイバーであればほとんど損失なく実現することができる。

一般に、これまでのレーザー共振器はミラーで共振器が構成されてきた。しかし、ミラーはどうしても曇りや汚れを避けることができず、クリーニングなどのメンテナンスが必要になる。また、機械的な振動や温度変化によって、設置したミラーにずれが生じ、安定性にも問題があった。また、光増幅媒質にも小型な結晶が用いられており、発熱を抑えるため、冷却装置が不可欠であった。

これに対し、共振器が光ファイバーで構成されるファイバーレーザーは、以下のような多数の長所を有している。このポテンシャルの高さから、最も実用的なレーザーとして認められてきている。

① 小型・軽量：光ファイバーは、巻いてしまえば非常にコンパクトになり、小型・軽量な光源になる。また、配置場所も柔軟に決めることができる。電源さえあれば、ほぼどこでも設置でき、すぐに立ち上げることができる。

② メンテナンスフリー・長期安定：共振器がほぼすべて光ファイバーで構成されており、空間に出ている部分が少ない。固体レーザーなどでは、空間に出ているミラーなどが塵や埃などのためどうしてもゆっくりと曇っていき、また、振動や温度変化によってずれが生じ、定期的なメンテナンスが必要になる。これに対し、ファイバーレーザーでは、ミラーもファイバー型回折格子としてファイバー中に作り込むことができ、またリング共振器構成にすると、反射体が不要になる。そのため、曇る部分がなく、メンテ

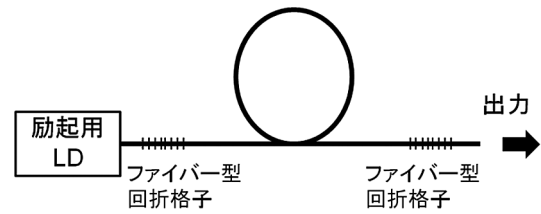


図2 ファイバーレーザーの基本構成。

ナンスフリーで長期的に安定な特性を示す。

③ ビーム品質に優れる：光ファイバーから射出されるビームは、NAも小さく、集光しやすい。また、小径で真円のコアから射出されるため、空間的なプロファイルもほぼ真円で、集光すると小さなスポットが得られ、他のレーザーと比較して、分解能の高い加工や計測が実現できる。また、固体レーザー等で現れる熱によるビームの変位もなく（熱レンズ効果）、長期間安定な特性を得ることができる。

④ 広帯域・高利得・高効率：ファイバー増幅器は、連続に広がり、比較的広い利得帯域を有する。660～1100 nm と広い利得帯域を有するチタンサファイアには劣るものの、Er 添加ファイバー、Yb 添加ファイバーとも約 100 nm の広い利得帯域を有しており、固体レーザー結晶の代表である YAG レーザーの帯域 1～10 nm と比較しても数倍広く、超短パルスを生成することができる。また、数 mm ～数 cm の結晶で励起する固体レーザーと比較して、相互作用長を長くとることができるため、高い利得を得ることができる。また、励起光を光ファイバーの中に閉じ込めて導波させるため、励起効率も高く、光-光変換効率で～70%、電気-光変換効率でも～30% が得られる。

⑤ 高出力化が容易：ファイバーレーザーは、出力を光ファイバー増幅器に通すことで、さらに高出力化を図ることができる。光ファイバー増幅器への接続も、ファイバーレーザーの出力ファイバーをファイバー増幅器にそのまま接続するだけでよく、容易に増幅することができる。

⑥ 放熱性に優れる：一般に、レーザーにおいて、熱は重要な問題である。固体レーザーでは小さな結晶で光を増幅させるため、水冷装置の使用が必須で、最近では結晶を薄くディスク状にして、冷却装置への設置面積を広くしたディスクレーザーの開発が盛んである。一方、ファイバーレーザーは、数 m の光ファイバーで効率よく光を励起させることができ、単位体積に対して表面積が広いので、放熱性が高く、出力 100 W 程度までは水冷を必要とせず、空冷でよい。そのため、装置がコンパクトになり、電源さえあればどこでも動作させることができる。

以上のような多数の長所から、ファイバーレーザーは最

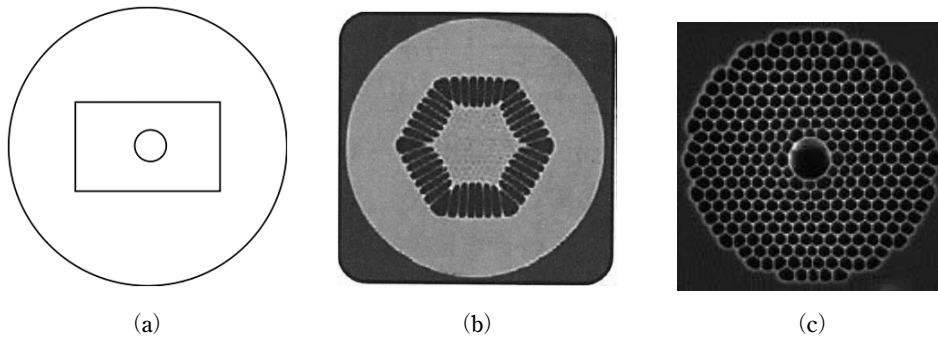


図3 各種ファイバーの断面写真, (a), (b) ダブルクラッドファイバー, (c) フォトニックバンドギャップファイバー.

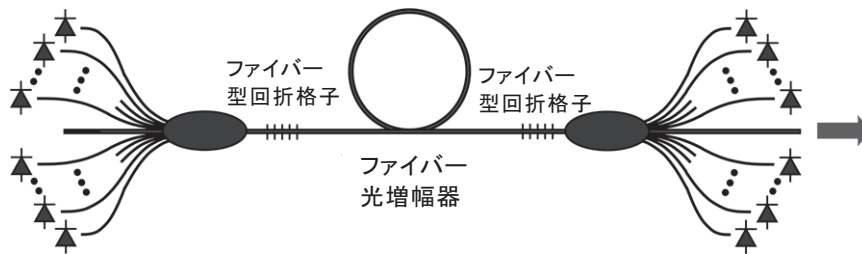


図4 高出力CWファイバーレーザーの構成例.

も実用的な、ポテンシャルの高いレーザーとして認められ、その活用が広がっている。実際にファイバーレーザーを組んでみると、発振させることが難しいはずのレーザーが容易に発振するのに驚くであろう。

2. 各種ファイバーレーザー

以下に、動作の異なる各種のファイバーレーザーについて、最近の進展を概説していく。

2.1 CW (連続波) レーザー

CW ファイバーレーザー発振器の基本構成を図2に示す。代表的な高出力CWファイバーレーザーは、ファイバー増幅器をファイバー型回折格子で挟んで共振器を構成する。これに励起LDの出力を導入することで、レーザー発振器が構成される。すべてファイバー型デバイスで構成されており、メンテナンスフリーな構成を実現することができる。

最近、ファイバーレーザーの高出力化に向けた研究が精力的に進められ、その実現に向けて新しい光ファイバーデバイスが開発されてきた。図3(a), (b)にダブルクラッドファイバーの断面図を示す。通常のシングルモードファイバーと同様の構造をもつファイバー増幅器では、信号光と励起光を重ねて小径のコアに結合する必要があるため、横モードもシングルモードの励起LDが必要になる。しかし、シングルモードの励起LDは、最大出力が現在でも1W弱であり、ファイバーレーザーの最大出力を制限する

要因になる。これに対しダブルクラッドファイバーでは、励起光を導波するクラッドは径が大きいため、励起LDの横モードがマルチモードでも結合をさせることができる。また、スターカップラーを用いると、数十個の励起LDの出力を導入させることが可能である。

また、大口径 (large mode area; LMA) ファイバーの開発も高出力化に大きく寄与している。シングルモードファイバーでは、誘起される非線形効果によって最大出力が制限を受ける。これに対し、NAを小さくし、これまでよりも大きなコア径でもシングルモード伝搬ができるようにしたのが、LMAファイバーである。フォトニック結晶ファイバーの構造を用いると、より大きなコア径でもシングルモード伝搬を実現することができる。

図4に、高出力CWファイバーレーザーの構成を示す^{4,5)}。LMAのダブルクラッドファイバーに高出力LDをスターカップラーで重ね合わせて導入し、現在では、シングルモード出力でも最大10kWの出力が達成されている。今後、さらなる高出力化が期待されている。また、マルチモード出力では、さらに高出力なファイバーレーザーが実現されている。CWファイバーレーザーについては、文献4および5が詳しい。

このほかにも、フォトニックバンドギャップファイバー、ロッドファイバー、chirally-coupled core (CCCまたは3C) ファイバーなど、新しい特殊ファイバーが開発されている⁶⁾。大口径ファイバーを用いた高出力ファイ

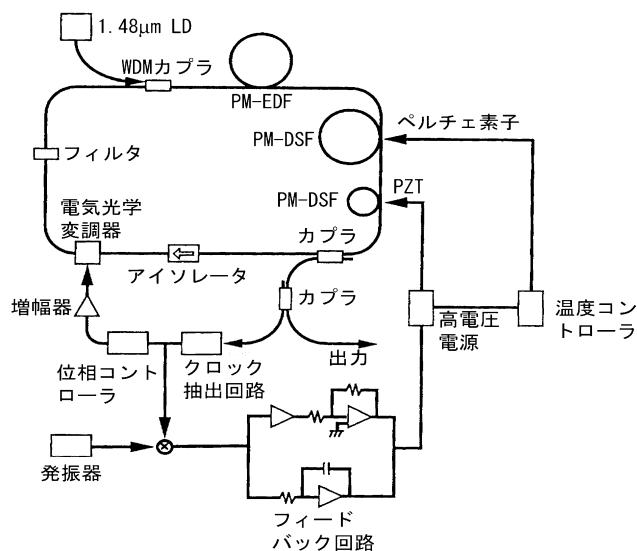


図5 高繰り返し能動モード同期ファイバーレーザーの構成。

レーザーについては、本特集の吉田氏の解説をご参照いただきたい。

2.2 パルスレーザー⁶⁾

パルスレーザーは、共振器内に変調器を用い、強制的にモード同期を掛ける能動モード同期レーザー、光強度に依存して透過率が変化する要素を用い、受動的にモード同期を掛ける受動モード同期レーザー、直接変調 LD などのパルス光源を増幅して用いる光源、の大きく3つのタイプに分類される。3つめの光源については諸橋氏の解説があるので、ここではおもに2種のモード同期レーザーについて紹介する。

① 能動モード同期レーザー：リング共振器中に強度変調器を配置し、共振器周波数の整数倍で変調器をオン/オフさせると、各縦モード間に相関が形成され、位相が揃う。そして、変調周波数の繰り返しでコヒーレントなパルスを出力することができる。また、共振器周波数の整数倍で変調器を駆動する高調波モード同期という手法で、パルス幅ピコ秒台の高繰り返しなパルス列を生成できる。この手法では、変調器の動作速度で繰り返し周波数が制限され、40 GHz の高繰り返しなパルス列が生成されている⁷⁾。これだけ高速な能動モード同期レーザーは、ファイバーレーザー以外では、筆者の知る範囲では半導体レーザーしかない。一般に強度変調器が用いられるが、位相変調器でもモード同期が得られることが報告され、研究が進められている。

能動モード同期ファイバーレーザーでは、温度や湿度などの環境の変化によって偏光状態が変化してしまい、安定化制御なしでは長期的に安定な出力を得ることは難しい。図5は、繰り返し40 GHzの全偏波保持型の高調波モード

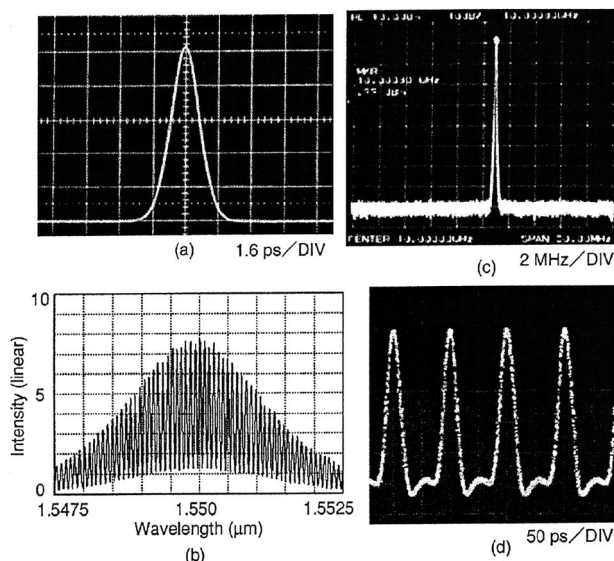


図6 高繰り返し能動モード同期ファイバーレーザーの出力の特性。(a) 自己相関波形、(b) 繰り返し周波数信号、(c) 光スペクトル、(d) パルス列。

同期ファイバーレーザーの構成を表している⁷⁾。共振器をすべて偏波保持ファイバーで構成し、また出力パルスから得た信号を用いて繰り返し周波数が一定になるよう、共振器長を外部制御する位相同期ループ(PLL)を用いた再生モード同期によって、タイミングジッターの少ない高繰り返し能動モード同期ファイバーレーザーが開発されている。

図6は、高調波モード同期ファイバーレーザーの出力パルスの各種特性を表している。繰り返し周波数が高いため、各縦モードを光スペクトルアナライザーで直接見ることができる。このレーザーは、高速光通信の光源などとして研究が進められている。

ほかに、LDと変調器を用いて発生した短パルスを実圧縮で短パルス化していく光源がある。特徴として、パルスの繰り返しを任意に設定することができる。これも、ファイバーの特性をうまく活用したユニークな光源である。これに関しては、本特集の諸橋氏の解説をご参照いただきたい。

② 受動モード同期レーザー^{6,8,9)}：受動モード同期レーザーは、共振器内に光の強度に依存して透過率が変化する要素を用い、自然にピーク強度の高い成分が生き残るようにすることで受動的にモード同期を掛ける手法である。このとき、スペクトルの縦モード間の位相も自動的に揃うため、受動モード同期とよばれる。おもに、光ファイバーの非線形効果を用いるタイプと、半導体やカーボンナノチューブなどの可飽和吸収体を用いるタイプ、そしてその複合型のタイプがある。

図7は、可飽和吸収体と非線形偏波回転の2つを用いて

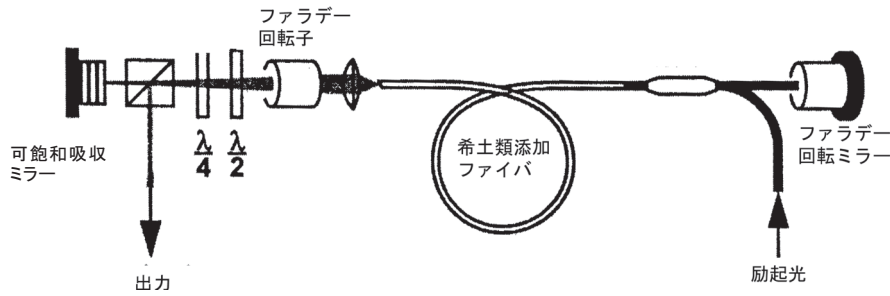


図7 非線形偏波回転と可飽和吸収ミラーを用いた受動モード同期超短パルスファイバーレーザー。

受動モード同期を掛けるタイプの超短パルスファイバーレーザーの構成を表している。可飽和吸収体は照射する光強度が強いほど吸収が飽和し、透過率が増加する特性をもつ。そのため、ファイバー増幅器から放出される雑音成分の中からピークの強い成分が生き残り、発振するパルスの種となる。また、非線形偏波回転は、光の強度が誘起する非線形屈折率変化によって、偏光状態が強度に依存して変化する現象で、波長板の調整で光強度が高いときの偏光成分が生き残るように調整することで、短パルス光の透過率を上げ、受動モード同期を得ることができる。光ファイバーにおける非線形屈折率変化の時間応答はきわめて高速で、30 fs ~ 1 ps の超短パルス光のモード同期発振を得ることができる。

ファイバー非線形効果を利用するタイプでは、非線形偏波回転のほかに、ファイバーループミラーを用いた8の字型がある。可飽和吸収体には、多重量子井戸型の半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) がおもに用いられてきたが、最近、カーボンナノチューブとグラフェンが新しい可飽和吸収体として注目を集め、盛んに活用されるようになってきた。詳しくは次の山下氏の解説をご参照いただきたい。

ファイバーレーザーの特徴のひとつに、共振器全体が光ファイバーという導波路で構成されるため、導波路の影響を強く受ける、という点が挙げられる。具体的には、光ファイバーが有する波長分散と非線形効果の影響である。この二者の制御によって、さまざまな発振モードを得ることができる¹⁰⁾。

最も代表的な発振モードが、共振器全体の分散値 D_T が異常分散のときに得られる「ソリトンモード同期」である¹¹⁾。sech²型のほぼチャープフリーな超短パルスを安定に出力し、分散値と非線形性などから決まる周波数に Kelly sideband とよばれるスペクトルピークが特徴的に現れる。ソリトンの単一パルス条件の制約から、1つのパルス内に高いエネルギーを保持するのが難しい。

D_T がゼロに近いときに、ストレッチパルスモード同期が得られる¹²⁾。このモードでは、パルスが伸縮を繰り返す

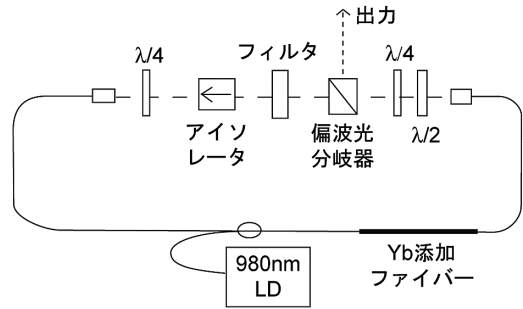


図8 非線形偏波回転を用いた Yb 添加全正常分散 (散逸性ソリトン) モード同期ファイバーレーザー。

ながら共振器を伝搬し、共振器1周においてチャープが反転し、パルス幅の極小点が2度現れる。パルススペクトルの幅が最も広く、一般にチャープしたパルスが出力されるが、分散補償により高出力な超短パルスを得ることができる。

このストレッチパルスモード同期に近い構成で、シミュラリトンモード同期がある。シミュラリトンモード同期では、分散値の分布はストレッチパルスモード同期に近いが、チャープの反転は起こらず、常に正にチャープしている。パルス幅の最小点は1点で、増幅器ではシミュラリトン増幅により、スペクトルが広がる。このモードの発展形で、最近、「ソリトン・シミュラリトンモード同期」という新しいモード同期の動作領域が見いだされた¹³⁾。この動作モードでは、周回しているパルスは異常分散ファイバーの部分ではソリトン伝搬を、また正常分散の増幅器中ではシミュラリトン伝搬をする。パルス幅の最小は、増幅器の前の1か所になる。増幅器の出力がほぼ線形チャープであり、高出力超短パルスの生成に有効であると期待されている。

上記のモードは、すべて Er 添加ファイバーレーザーにおいて見いだされた。これに対し、ファイバーが正常分散を示す Yb ファイバーレーザーにおいて、散逸性ソリトン (dissipative soliton) モード同期が新たに見いだされた^{14,15)}。 D_T が大きな正常分散のときに得られ、最もエネルギーの高いパルスを生成できる。スペクトルの両裾が切り立ったスペクトル形状をしており、ほぼ線形チャープな

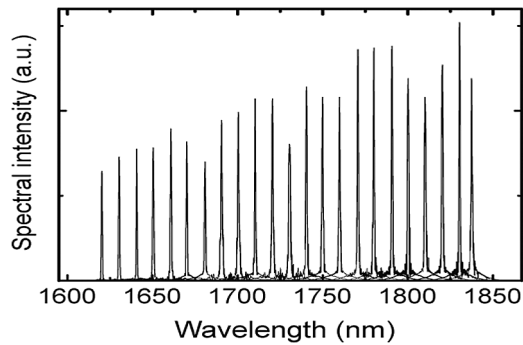


図9 波長可変ソリトンパルスを用いた楕円分布ファイバーを用いてスペクトル圧縮し実現した、広帯域狭線幅波長可変光源のスペクトル。

高エネルギーパルスを出力する。パルス幅の最小は通常1点で、正常分散ファイバーで大きくパルス幅が広がる。散逸性ソリトンモード同期はパラメーターが多く、複数の異なるスペクトル形状を取り得る。全正常分散 (all-normal dispersion: ANDi) モード同期も、散逸性ソリトンモード同期の一種である¹⁴⁾。その後、Er 添加ファイバーや Tm 添加ファイバー等でも、散逸性ソリトンの発振が確認されている。

他のレーザーとの比較では、新しいファイバーの開発で共振器出力強度も年々増加しているが、固体レーザーのほうが出力とパルスの品質が勝っている。

3. ファイバーレーザーの高機能化

3.1 広帯域化

ファイバーレーザーは、光通信の成熟とともに波長 1.55 μm 帯の Er 添加ファイバーレーザーを中心にベースの研究が進展し、その後、量子効率が高く帯域も広い波長 1.06 μm 帯の Yb 添加ファイバーレーザーによって、さらに進化を遂げてきた。最近、新たな波長帯として、可視域に利得をもつ Pr 添加ファイバーや、2 μm 帯の Tm 添加ファイバーなどによって、短波長域、および長波長域の研究も進められている。

さらに帯域を拡張するためには、非線形光学効果の活用が必要になる。超短パルス光を異常分散を示す光ファイバーに入射すると、誘導ラマン散乱とソリトン効果の相乗効果によって、光の強度に対し波長が連続に長波長側にシフトする超短ソリトンパルスを生成することができる。1999年に、波長 1.55 μm で発振する Er 添加ファイバーを種として、波長 1.6~2.0 μm の波長可変ソリトンパルスの生成が報告された¹⁶⁾。また、Yb 添加ファイバーを用いて、波長 1.0~1.7 μm までの波長シフトが報告されている¹⁷⁾。

生成されるソリトンパルスは、100~200 fs の超短パル

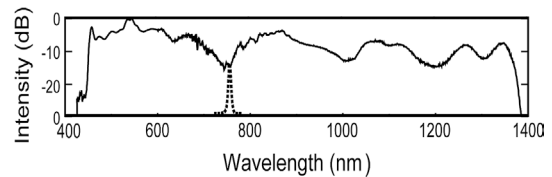


図10 フォトニック結晶と Er 添加ファイバーレーザーの第二高調波を用いて生成した可視~近赤外超広帯域スーパーコンティニュームのスペクトル。

スであるため、フーリエ変換限界の制限から、スペクトル幅が数十 nm と広い。最近、筆者らは、楕円分布ファイバーの技術を用いて擬似的な分散増加ファイバーを開発し、広帯域にわたる高度なスペクトル圧縮に成功した¹⁸⁾。パルス幅は 200 fs から 5 ps 程度のほぼチャープフリーなパルスが生成された。この光源を用いて、リアルタイムな分光計測が報告されている¹⁹⁾。

励起パルスから長波長側にソリトンパルスが分裂する際に、短波長側にアンチストークスパルスが生成される²⁰⁾。このアンチストークスパルスも、強度に依存して若干波長が単調に変化する。また、長波長側に生成されるソリトンパルスを用いてこのアンチストークスパルスを「捕捉」し、波長を制御することもできる²¹⁾。

スーパーコンティニューム (SC) は、非線形効果を用いてスペクトルを広げた広帯域光源である。これまでは、高強度なパルス光を、水等のバルク状の媒質に集光し、帯域を広げていた。2000年ごろにフォトニック結晶ファイバーや高非線形ファイバーが開発され、超短パルス光を結合することで、1オクターブ以上、超広帯域に広がる SC 光の生成が、平均強度約 30 mW のパワーで可能になった²²⁻²⁴⁾。

光ファイバーのゼロ分散波長の近傍に超短パルス光を入射すると、超広帯域に広がるスーパーコンティニューム光を生成することができる。しかし、そのような SC 光は雑音が多く、コヒーレンスも悪く、高精度な応用には実用上問題があった。

筆者らは、正常分散特性と高い非線形性を示すファイバーを用いて、平坦性に優れ、かつコヒーレントで雑音も少ない、コヒーレントな SC 光の生成に成功した²⁵⁾。この光源は広帯域なレーザー光として機能する新しい光源であり、今後の展開が期待される。

3.2 短パルス化

受動モード同期超短パルスファイバーレーザーの出力パルスの時間幅は、一般に 100 fs 程度である。100 fs 程度の超短パルスはそれほどすぐには広がらないため、使いやすい超短パルスである。Yb 添加ファイバーレーザーでは、利得帯域が広く、波長も 1 μm と 1.55 μm の Er より短い

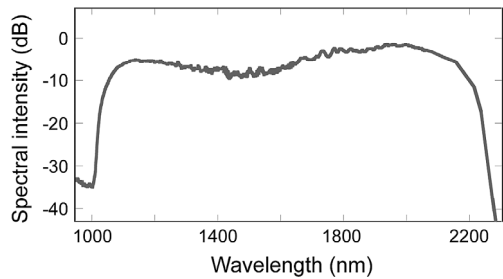


図 11 高精度コヒーレントスーパーコンテニューム光のスペクトル。

め、さらに狭いパルスの生成も研究レベルで報告されている。筆者らは、複数のファイバーを用いたハイブリッドファイバーの構成で、Er 添加ファイバーをベースに 13 fs の極短パルス光の生成に成功した²⁶⁾。最近、2つのキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} を安定化した SC 光を重ね合わせることで、4.3 fs の極短パルスの生成が、ファイバーレーザーベースの光源で実現された²⁷⁾。

3.3 高繰り返し化・低繰り返し化

能動モード同期ファイバーレーザーにおける繰り返し周波数は、デバイスの周波数帯域で制限される。前述のように、40 GHz の高繰り返しで安定なファイバーレーザーが実現されている⁷⁾。また、LD と変調器からスタートする光源では、繰り返し周波数を自由に制御できる。

受動モード同期ファイバーレーザーでは、繰り返し周波数は共振器長に依存して変化する。共振器内に複数のパルスが発振する状態は一般に不安定であり、実用には適さない。最近、単層カーボンナノチューブ (SWNT) と 5 mm の EDF を用いて、最大約 20 GHz の高繰り返し受動モード同期レーザーが報告された²⁸⁾。また、偏波保持ファイバーを用いた数 km の長尺な共振器と SWNT を用いて、150 kHz の超低繰り返し受動モード同期ファイバーレーザーも報告されている²⁹⁾。

3.4 高エネルギー化

高エネルギーパルスファイバーレーザーは、一般に、上記のモード同期ファイバーレーザーのパルスを間引いたり、種のパルス光源に低繰り返しのパルス光源を用いて、高エネルギーパルスの生成が行われてきた。高いピーク強度が誘起する非線形効果の低減が最重要な課題であり、LMA ファイバーや CCC ファイバー、チャープパルス増幅が用いられている。導波路の影響を強く受けてしまうファイバーレーザーは、パルス波形の品質においては、理想的な高出力超短パルスを生成できる固体レーザーには現状では劣っている。

最近、次世代に向けたさらなる高出力化の試みとして、

コヒーレントビーム結合の研究が盛んになってきている。位相の制御が課題であるが、原理的には複数のビームを輝度を落とすことなく重ねていくことができる。また、マルチコアファイバーを用いた試みも進んでいる⁴⁾。これらの試みが世界的に取り組みされており、注目を集めている。

4. ファイバーレーザーの応用

4.1 光周波数コム

光周波数コムは、モード同期超短パルスレーザーの代表的な応用例のひとつである。1 オクターブ以上広がるスーパーコンテニューム光を生成し、非線形結晶を用いて長波長端の第二高調波を生成して短波長端と重ね合わせる。フォトダイオードでビート信号を検出することで、 f_{ceo} を観測し、フィードバック制御を行う。安定化を図ることで、光周波数コム光源として活用することができる。

光周波数コムの縦モードの線幅自体は、固体レーザーであるチタンサファイアレーザーのほうが 1~2 桁狭い。これは、導波路である光ファイバーの有無の差だと考えられる。しかし、実用面では、ファイバーレーザーベースの光周波数コム光源が、メンテナンスフリーな実用的なシステムとなる。実際に、産業技術総合研究所 (産総研) で用いられている日本の長さ標準には、ファイバーレーザーベースの光周波数コムシステムが用いられている³⁰⁾。また、最近、Yb 添加ファイバーレーザーをベースに、XUV 域の光周波数コムの生成が報告された³¹⁾。

4.2 非線形顕微鏡・OCT・医療応用

実用的なファイバーレーザーは、超短パルスを必要とする非線形顕微鏡においても、活用が進んできた³²⁾。スーパーコンテニューム光を用いた超高分解能 OCT でも活用が進んでいる³³⁾。超短パルス、および CW のファイバーレーザーは、LASIK をはじめとした眼科分野や皮膚科などでも研究・開発が進み、臨床でも活用され始めている。

4.3 レーザー加工

前述のように、ファイバーレーザーの高出力化は大きく前進してきた。CO₂ レーザーとファイバーレーザーが最も大きな出力を出せるレーザーであるが、波長の長い CO₂ レーザーと比較し、集光性や励起効率に優れ、メンテナンスフリーなファイバーレーザーの導入が進んでいる。また、レーザーマーカーなど、多種の産業応用に活用されは始めている。

ファイバーレーザーの分野は、この 10 年で大きな進歩を遂げてきた。特に、高出力化と超短パルスファイバーレーザー関連の技術が進み、ファイバーレーザー用の特殊

ファイバーや光デバイスも増加し、ファイバーレーザーの製品も増えてきた。また、実用面を意識したファイバーレーザーを用いたレーザー応用研究の数も増加している。ポテンシャルが高く、実用性に優れたファイバーレーザーは、今後も進展を続けることが期待される。

文 献

- 1) E. Snitzer: "Optical master action of Nd^{3+} in a barium crown glass," *Phys. Rev. Lett.*, **7** (1961) 444-446.
- 2) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at $1.54 \mu\text{m}$," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1026-1028.
- 3) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki: "Efficient Er^{3+} doped optical fiber amplifier pumped by a $1.48 \mu\text{m}$ InGaAsP laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 295-297.
- 4) 白川 晃: "第5章 ファイバーレーザー", 先端固体レーザー, (社)レーザー学会編(オーム社, 2011).
- 5) 住村和彦, 西浦匡則: 解説 ファイバーレーザー—基礎編—(オプトロニクス社, 2010).
- 6) 西澤典彦: "第18.3章 モード同期ファイバーレーザー", レーザーハンドブック第2版, (社)レーザー学会編(オーム社, 2005年) pp. 369-377.
- 7) M. Yoshida, T. Yaguchi, S. Harada and M. Nakazawa: "A 40 GHz regeneratively and harmonically mode-locked Er-doped fiber laser and its longitudinal mode characteristics," *IEICE Trans. Electron.*, **E87-C** (2004) 1166-1172.
- 8) M. E. Fermann, A. Galvanuskas and G. Sucha: *Ultrafast Lasers, Technology and Applications*, Section 2 and 3 (Marcel Dekker, 2003) pp. 89-217.
- 9) G. P. Agrawal: *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed. (Academic Press, 2008).
- 10) F. Wise, A. Chong and W. H. Renninger: "High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion," *Laser & Photon. Rev.*, **2** (2008) 58-73.
- 11) I. N. Dulling III: "Subpicosecond all-fiber erbium laser," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 544-545.
- 12) K. Tamura, E. P. Ippen and H. A. Haus: "Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 158-160.
- 13) B. Oktem, C. Ulgudur and F. O. Ilday: "Soliton-similariton fiber laser," *Nature Photon.*, **4** (2010) 307-311.
- 14) A. Chong, J. Buckley, W. Renninger and F. W. Wise: "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser," *Opt. Express*, **14** (2006) 10095-10100.
- 15) W. H. Renninger, A. Chong and F. W. Wise: "Dissipative solitons in normal-dispersion fiber laser," *Phys. Rev. A*, **77** (2008) 023814.
- 16) N. Nishizawa and T. Goto: "Compact system of wavelength-tunable femtosecond soliton pulse generation using optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1999) 325-327.
- 17) J. Takayanagi, T. Sugiura, M. Yoshida and N. Nishizawa: "1.0-1.7 μm wavelength tunable ultrashort pulse generation using femtosecond Yb-doped fiber laser and photonic crystal fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (2006) 2284-2286.
- 18) N. Nishizawa, K. Takahashi, Y. Ozeki and K. Itoh: "Wideband spectral compression of wavelength-tunable ultrashort soliton pulse using comb-profile fiber," *Opt. Express*, **18** (2010) 11700-11706.
- 19) N. Nishizawa and K. Takahashi: "Time-domain near-infrared spectroscopy using a wavelength tunable narrow linewidth source by spectral compression of ultrashort soliton pulses," *Opt. Lett.*, **36** (2011) 3780-3782.
- 20) N. Nishizawa, R. Okamura and T. Goto: "Widely wavelength tunable ultrashort soliton pulse and anti-Stokes pulse generation for wavelengths of 1.32-1.75 μm ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L409-L411.
- 21) N. Nishizawa and K. Itoh: "Control of optical pulse at visible region using pulse trapping by soliton pulse in photonic crystal fiber," *Appl. Phys. Exp.*, **2** (2009) 062501.
- 22) J. K. Ranka, R. S. Windeler and A. J. Stentz: "Visible continuum generation in air silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 25-27.
- 23) T. A. Birks, W. J. Wadsworth and P. St. J. Russell: "Supercontinuum generation in tapered fibers," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1415-1417.
- 24) N. Nishizawa and T. Goto: "Widely broadened super continuum generation using highly nonlinear dispersion shifted fibers and femtosecond fiber laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L365-L367.
- 25) J. Takayanagi and N. Nishizawa: "Generation of widely and flatly broadened, low-noise and high-coherence supercontinuum in all-fiber system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) L441-L443.
- 26) T. Hori, N. Nishizawa and T. Goto: "Generation of 14 fs ultrashort pulse in all fiber scheme by use of highly nonlinear hybrid fiber," *Ultrafast Phenom.*, **16** (2005) 31-33.
- 27) G. Krauss, S. Lohss, T. Hanke, A. Sell, S. Eggert, R. Huber and A. Leitenstorfer: "Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fiber technology," *Nature Photon.*, **4** (2010) 33-36.
- 28) A. Martinez and S. Yamashita: "Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes," *Opt. Express*, **19** (2011) 6155-6163.
- 29) Y. Senoo, N. Nishizawa, Y. Sakakibara, K. Sumimura, E. Itoga, H. Kataura and K. Itoh: "Ultralow-repetition-rate, high-energy, polarization-maintaining, Er-doped, ultrashort-pulse fiber laser using single-wall-carbon-nanotube saturable absorber," *Opt. Express*, **18** (2010) 20673-20680.
- 30) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi and M. Nakazawa: "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," *Opt. Express*, **14** (2006) 5223-5231.
- 31) A. Cingoz, D. C. Yost, T. K. Allison, A. Ruehl, M. E. Fermann, I. Hartl and J. Ye: "Direct frequency comb spectroscopy in the extreme ultraviolet," *Nature*, **482** (2012) 68-71.
- 32) Y. Ozeki, W. Umemura, Y. Otsuka, S. Satoh, H. Hashimoto, K. Sumimura, N. Nishizawa, K. Fukui and K. Itoh: "High-speed molecular spectral imaging of tissue with stimulated Raman scattering," *Nature Photon.*, **6** (2012) 845-851.
- 33) N. Nishizawa: "Generation and application of high-quality supercontinuum sources," *Opt. Fiber Technol.*, **18** (2012) 394-402.

(2013年5月9日受理)