

# ファイバレーザ： 技術と応用の最先端

ジェフ・ヘクト

ファイバレーザは小型かつロバストで、アラインメントの狂いもなく、熱エネルギーを容易に放散する。他のレーザと同じくさまざまに構成できるという利点をもつとともに、独自の優位性も生む。

ファイバレーザは標準的な固体レーザの一種だが、その媒体はロッド、スラブ、ディスクなどではなく、クラッドしたファイバから構成される。レーザ光はファイバの中心にあるコア中のドーパントから放射されるが、コア構造は簡単なものからかなり複雑なものまでさまざまに構成できる。ファイバレーザの重要な点は、ファイバが大きな表面対体積比をもつので、熱が比較的容易に放散することにある。

ファイバレーザは光学的にポンプされ、そのほとんどは半導体レーザを使うが、ごく一部は他のファイバレーザも使用する。これらのシステムの光学系は一般にファイバ部品が使われ、そのほとんどがファイバを用いて相互に接続される。バルク光学系を使用する場合もあり、内部のファイバ結合系を外部のバルク光学系と組み合わせる場合もある。

ポンプ用の半導体レーザ光源はファイバを取り付けた単一レーザ、アレイレーザまたは多数の個別レーザが使われ、それぞれがファイバカップラと接続される。希土類元素をドーパしたファイバは両端に共振器ミラーを配置するが、実際のミラーはファイバ内部に製作されたファイバブラッググレーティングを使用する。ファイバの出力ビームがファイバ以外の部品に結合する場合を除いて、ファイバレーザの両端に

バルク光学系が配置されることはない。ファイバはコイル状に巻きつけられるので、必要な場合は何メートルものレーザ共振器を使うことができる。

## 二重コア構造

ファイバレーザに使用するファイバは構造が重要になる。その最も一般的な形状は二重コア構造である(図1)。ドーパなしアウターコア(インナークラッドと呼ばれることもある)はポンプ光を捕集し、ファイバに沿って導波する。ファイバから発生する誘導放出は一般に単一モードでインナーコアを伝搬する。インナーコアはポンプ光によって誘導放出を発生するドーパント(イッテルビウムまたはエルビウム)が含まれる。アウターコアの断面は多数の非円形状が使われる。その六角形、D字型、長方形などの形状はポンプ光が中心コアから失われる機会を少なくする。

ファイバレーザは端面または側面か

らポンプされる(図2)。端面ポンプの場合は1つ以上のポンプレーザからのポンプ光がファイバ端面に入射する。側面ポンプの場合はポンプ光がファイバの側面に結合する。実際には光が中心軸の直角から入射するレーザロッドの側面ポンピングとは異なり、ポンプ光をアウターコアに結合するカップラが使われる。

ファイバレーザのポンピングは多数の設計が検討された。ポンプ光のコアへの結合、その光吸収との整合およびポンプ光のインナーコアへの結合を注意深く設計することで、インナーコアに誘導放出を起こす反転分布が形成される。レーザコアの利得の度合いはファイバへのドーピングとファイバ長に依存する。設計者はこれらの要因を調整し、必要とされる性能を確保する。

得られるパワーには限界があり、とくに単一モードファイバ内部の動きが制約要因になる。このようなファイバコ

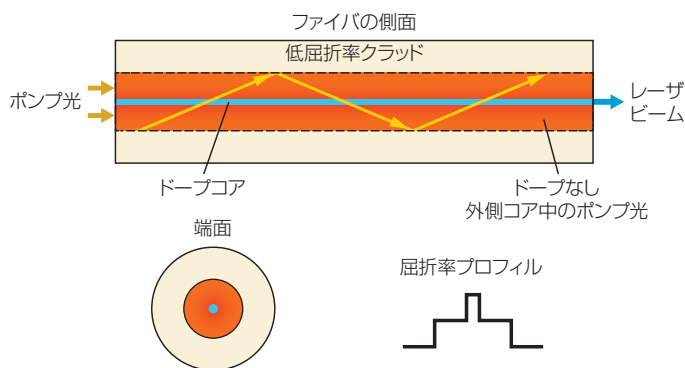


図1 ファイバレーザの構造にはレーザ本体としての希土類元素ドーパインナーコア、ポンプ光を導波するドーパなしアウターコア(インナークラッドとも呼ばれる)およびアウタークラッドが含まれる。

アは断面積が非常に小さいので、通過光の強度は非常に高くなる。強度が強いほど非線形ブリルアン散乱が重要になり、マルチキロワットレベルの出力に対して限界をもたらす。出力があまりにも高いと、ファイバ端面には光学的損傷が発生する。

## ファイバレーザの特徴

ファイバをレーザ媒質に使用すると、半導体レーザによるポンピングに十分な長い相互作用長が得られる。この幾何学形状は高い光子変換効率をもたらす。ファイバ部品を融着接続すると、調整の必要な離散光学系は不要になり、アラインメントからも解放される。

ファイバベースのレーザ設計は高度な適応性が得られ、重い鋼鉄の溶接からフェムト秒パルス生成まですべての用途への対応が可能になる。ファイバレーザには多数のバリエーションがあり、厳密に言えば、ファイバレーザでない構造もある。ファイバ増幅器は単一光路による増幅が可能であり、多数の波長を同時に増幅できるので、光通信に使用される。ファイバ増幅はファイバレーザの出力を意図的に増強するマスタ発振器パワー増幅器(MOPA)にも使用される。ファイバ増幅器が連続波(CW)レーザと一緒に使用される場合もある。

もう1つの例には誘導放出を抑圧したファイバ増幅自然放出光源がある。別の例にはラマン利得にもとづくラマンファイバレーザがあり、そこでは基本的に波長のラマンシフトが起こる。この増幅手法は普及していないが、研究には使われている。標準的なシリカファイバではなく、フッ化物ガラスファイバを使用して、ラマンレーザの発振と増幅の新しい研究が行われている。

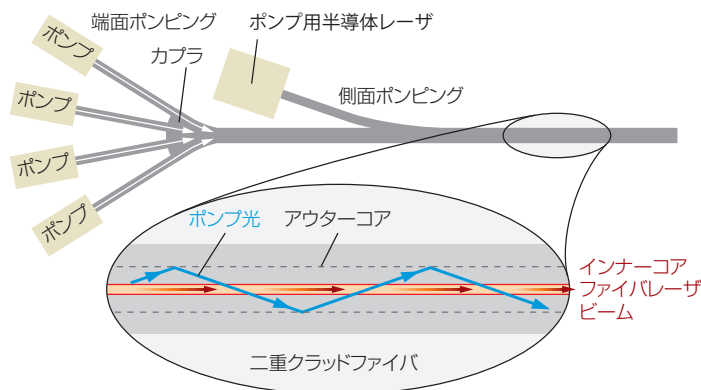


図2 ファイバレーザは単一または多数のレーザによる端面ポンピング、または側面からポンプ光をアウターコアに結合する側面ポンピング(一般に多数のレーザを使用する)が使われる。

表1 光子変換効率

活性元素	出力	励起バンド	光子変換効率
ネオジム(固体レーザ)	1064~1088nm	808nm	76%
イッテルビウム	1030~1100nm	910、940、975nm	940/1030において90%以上
エルビウム	1550バンド	980、1480nm	95%または63%
Yb-Er	エルビウム	イッテルビウム	
ツリウム	1750~2100nm	793nm	2アウト/1イン

しかし、ファイバレーザ用の母材はコアに希土類元素ドーパントをもつシリカガラスが広く使われている。ドーパントはイッテルビウムとエルビウムが基本になる。イッテルビウムは約1030から1080nmの範囲に中心波長があり、さらに広い範囲の発光波長を得ることもできる。940nmの波長領域で発光するポンプ用半導体レーザを使用すると、光子欠損が非常に少なくなる。イッテルビウムは高濃度であってもネオジムに起こるような自己消光効果が生じない。そのために、ネオジムはバルクレーザに使われ、イッテルビウムはファイバレーザに使用される(いずれもほぼ等しいレーザ波長が得られる)。

エルビウムファイバレーザはアイセーフ波長の1530から1620nmの範囲において発振する。この波長を周波数二倍化すると、他の方法ではファイバレーザから得ることのできない780nmのレーザ光が発生する。また、エルビウムにイッテルビウムを共ドープすると、イッ

テルビウムがポンプ光を吸収し、エルビウムへのエネルギー移動が起こる。別のドーパントのツリウムは、より深い近赤外(NIR:1750から2100nm)領域で発振し、もう1つのアイセーフ材料になる。

## 高効率

ファイバレーザは擬似3準位系レーザからなる。ポンプ光子は基底状態から上位の準位への遷移を励起し、レーザ遷移は上位の最低準位から基底状態の枝分れした準位に落ちる。これは効率が非常に高い。例えば、940nmのポンプ光子によるイッテルビウムは、1030nmの放出光子を発生し、その量子欠損(エネルギー損失)は約9%しかない(表1)。

対照的に、ネオジムの標準的な808nmポンプスペクトル線は約24%の量子欠損が生じる。したがって、イッテルビウムは基本的に高い効率が得られる。とは言いながら、イッテルビウムも光子の一部が失われるので、100%

の効率を実現することはできない。イッテルビウムは多数のバンドを用いて励起できる。エルビウムの励起は1480 nmまたは980nmのバンドを使用できるが、光子欠損の点から見ると、後者は効率的ではない。しかし、980nmは優れたポンプ光源を利用できる優位性が得られる。

ファイバレーザの全体効率は2段階のプロセスによって決まる。第1はポンプ用の半導体レーザの効率が重要になる。半導体レーザは効率が非常に高く、50%オーダの電気-光変換効率が得られる。実験室ではさらに良い結果も実証され、電氣的にポンプしたエネルギーの70%以上が光に変換されている。ポンプレーザからの出力をファイバレーザの吸収スペクトル線に注意深く整合すると、その結果がポンプ効率になる。

第2は光-光変換効率が重要になる。光子欠損が少ないと、高い励起効率と抽出効率が実現され、60%から70%オーダの光-光変換効率が得られる。その結果、ウォールプラグ効率は25%から35%の範囲になる。

## 目的別の多様な構成

連続波ファイバレーザは単一モードまたは多モード(横モード)が得られる。単一モードレーザは材料加工や大気伝搬用の高品質ビームが得られ、多モード産業用レーザはより高いパワー源になる。用途が極端に高い強度を必要としなければ単一モード動作でも十分だが、より高い全体パワーが必要になり、例えば、ある種の切断や溶接、また、大面積を照射して熱処理を行う場合は多モード動作に利点がある。

長いパルスのファイバレーザは基本的に擬似CWレーザであり、一般にミリ秒パルスを発生する。その代表的なレーザは10%のデューティサイクル(ポ

ンプ用半導体レーザから決まる)が得られる。その結果、ピークパワーはCW動作の10倍以上になる。このことはパルスレーザ穴あけなどの材料加工を行う場合の利点になる。繰返し速度はパルス継続時間に応じて、500Hzまでの範囲が得られる。

ファイバレーザはQスイッチングも可能だが、それはバルクQスイッチレーザの場合と同様の原理にもとづいている。標準的なパルス長は短いナノ秒から長いマイクロ秒までの範囲にあり、ファイバが長いほど、出力をQスイッチングして長いパルスを発生するには、より長い時間が必要になる。

ファイバの性質はQスイッチングに対していくつかの制約をもたらす。ファイバレーザはコアの断面積が非常に小さいので、非線形性効果が強くなり、そのピークパワーは制約される。バルク材料のQスイッチングを使用すると性能が向上する。また、ファイバレーザ本体の両端を融着接続するファイバQスイッチの方法も利用できる。

Qスイッチされたパルスはファイバ内またはバルク内での増幅が可能になる。後者は米国国立点火施設(National Ignition Facility; NIF)に適用され、ここではファイバレーザがNIFレーザの192本のビームのマスタ発振器となり、ファイバレーザからの小さいパルスがドープガラスの大型スラブ内でメガジュールのパワーに増幅されている。

モード同期ファイバレーザの場合、すべてのモード同期法と同様に、その繰返し速度は利得材料の長さに比例するが、パルス継続時間は利得帯域幅に依存する。発振器の実現可能な最短パルスは50fsの範囲にあり、その標準の

継続時間は100fsの範囲になる。発振器-増幅器システムは外部チャープパルス増幅とそれに続くパルス圧縮を行うことで、より短いパルスの発生が可能になる。

エルビウムドープファイバとイッテルビウムドープファイバには大きな違いがあるが、それは両者が異なる分散モードで動作することによる。エルビウムドープファイバは異常分散領域の1550nmにおいて発振し、ソリトン生成が可能になる。イッテルビウムファイバは正の正常分散領域をもつので、強いチャープパルスが発生する。その結果、パルスのチャープを解消してパルス長を圧縮するには、チャープファイバグレーティングが必要になる。

とくにピコ秒のような超高速研究を行う場合、ファイバレーザパルスの改変には、多数の方法がある。フォトリック結晶ファイバは極端に小さいコアを形成すると、スーパーコンティニューアの発生などに適した強い非線形効果を得ることができる。対照的に、フォトリック結晶は非常に大きい単一モードコアを形成することで、パワーが高いときの非線形効果を回避できる。

高パワーへの応用を目的にして、曲げの可能な大型コアフォトリック結晶ファイバが試作されている。この研究の狙いの1つは、ファイバの意図的な十分に強い曲げを可能にし、不要な高次モードを逃がし、基本横モードだけを残すことにある。非線形性は高調波の発生を可能にし、和周波数混合と差周波数混合からはより高い周波数とより短い周波数が生成される。非線形効果はパルス圧縮も可能にし、周波数コムを発生する方法をもたらす。

## 編集者注

この記事よりさらに深く知りたい場合はウェブサイト(www.laserfocus.com)を参照のこと。ここではファイバレーザの応用が詳細に記述されている。