

産業応用キロワットパワーの 超短パルスレーザー光源

ディーター・ホフマン、イェンス・リンパート、アンドレアス・ソス

ピコ秒及びフェムト秒レーザー光源と加工技術を10kW超に拡大。

モバイル機器のガラススクライビングアプリケーションで早期に広く利用されたことから、ピコ秒、フェムト秒の範囲でも、短パルス (USP) レーザは、10年以上前から利用できるようになっている。スプラッタや熱副作用なく、ミクロン精度で多くの材料を加工する能力は、産業 USP レーザで潜在的なアプリケーション範囲拡大に有望である。しかし、採算に乗るスルーputを達成するために、高繰り返しレートやハイパワーを必要とするアプリケーションでの USP レーザの利用には限界があった。

問題は、市場にある少数の USP レーザ光源は150W、150 μ J/パルスを超えるかもしれないが、ほとんどがそれ以下であるという点にある。たとえ強力な光源が利用できるとしても、付加的パワー

の利用は難しい。超短パルスは、多くが一点に集束しすぎるときに「コールドアブレーション」能力を失うからである⁽¹⁾。

この問題を理解した独フラウンホーファー研究機構は、USP レーザに大きな機会があると認定し、そのような新世代システムを開発するために同研究所の少なくとも13名の専門家を結集した。The Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources (CAPS) は、USP レーザパワーの限界を克服するだけでなく、パルス生成からプロセス技術、実世界のアプリケーションまでのプロセスチェーンに沿った技術も開発する計画である。

キロワット出力に拡大

CAPS プロジェクトは、フラウンホ

ーファーレーザー技術研究所 (フラウンホーファー ILT) とフラウンホーファー 応用光学・精密機械工学研究所 (フラウンホーファー IOF) が管理する。両研究所は、アプリケーション研究所を提供しており、また両ファシリティではレーザー光源とアプリケーションテストの並行開発が可能である。フラウンホーファー ILT のサイトは、2019年9月に開設、またフラウンホーファー IOF のサイトは、2020年早期に運営を始める。

パワーをスルーputに変換する問題は、USP レーザシステムにとっては新たなプロセス技術が必要になる。これは、高繰り返しレートと高パルスエネルギーでのレーザーと物質との相互作用について基礎研究から始まる⁽¹⁾。もう1つの課題は、出力分布である。高エネルギーパルスの1つの概念は、ビームを多数の並行ビームレットに分けることに関わる⁽²⁾。多数の同じようなビームレットによって、並行加工が可能になり、周期的構造のパターン加工が可能になる。これにより、大幅な生産性上昇が実現される可能性がある。

別のアプローチは、音響光学変調器をビームレットに構築し、個々のビームレットをON/OFFすることで実現できる、ある種のレーザーマトリクスプリンターを生み出すことに関与する。第3の極めて柔軟なバージョンでは、ビームレットは、液晶変調器を通して送り出される。これは、元のビームか

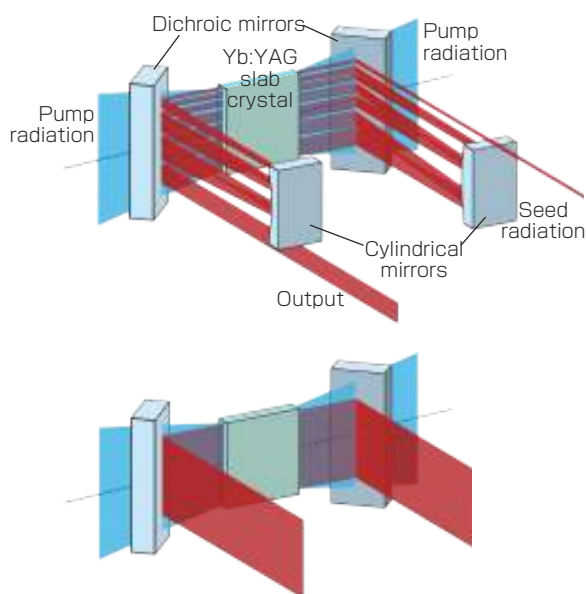


図1 500Wクラス Innoslab 増幅器は7パス構成で利得=53(上)、500Wクラス、シングルパス Innoslab パワーブースタは利得=2(下)を示している。

ら、ほとんどどんなパターン、ビーム特性でも生成できる。

これらのかなり高性能のソリューションは、より従来型の高速スキャナ技術と並行して開発されている。そのようなポリゴンスキャナは、CAPS内に適用され、スキャナ速度 $>300\text{m/s}$ を達成する。効率的なスキャニング戦略の開発のために、プロジェクトは、レーザ吸収及び吸収後の物理的プロセスの詳細なシミュレーションのためにソフトウェアを利用する。フラウンホーファー ILTのこのツールで、熱効果を研究し、加工パターンをテストすることができる。

スラブコンセプト

ハイパワー超短レーザパルス実現の1つのカギは、適切な増幅スキームの発見である。最近のIndustrial Laser Solutionsの記事は、100W以上にアッ

プスケールする技術を詳説しており、その記事は、ファイバとスラブ/ロッドコンセプトを考察している。CAPSプロジェクトの研究者は、実質的に10kW平均パワーへの前進を可能にするような非常に特殊な進歩を伴う概念も実行に移す。1つは、ファイバ増幅器とのコヒーレント結合であり、もう1つは特殊なダイオード励起スラブを使う。

スラブレーザシステムは、1966年にケミン・デュ氏(Keming Du)とピーター・ルースン氏(Peter Loosen)が特許を取得したInnoslabコンセプトに基づいている。その時、ケミン氏はフラウンホーファー ILTで働いていた。わずか5年後、同氏はそのアイデアを商用利用するために独エッジウェーブ社(EdgeWave)を設立した。フラウンホーファー ILTでは、Innoslabコンセプトは、さらに改善され、今日では、キロワットクラス USP レーザ増幅器に適

用されている⁽³⁾。これらの成果に基づいて、もう1つのスピンオフ企業、AMPHOS社が設立された。

Innoslab レーザの共振器セットアップは、2つのヒートシンク間の長方形の結晶をベースにしている。これは、コリメートされたレーザダイオードで長軸方向に励起されている(図1)。最初は、その設計はNd:YVO4及びNd:YAGレーザ結晶励起の連続波(CW)で開発された。異なる目的でいくつかの結晶材料の実証が行われ、サブピコ秒パルス幅の短パルスシステムには、Ybドープ結晶が最適であることが分かった。

図1は、Innoslab増幅器のセットアップを示している。中央に、部分的エンドポンプのスラブ結晶がある。その結晶のそばに2つのミラーがあり、それによってビームが複数回折り畳まれる。そのスラブ結晶は、励起光と増幅

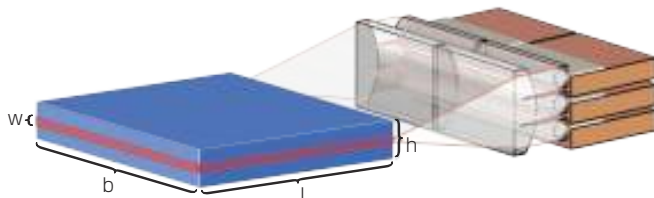


図2 部分励起Innoslab結晶(青)、励起領域(赤)及びbとl方向へ結晶が大きくなることによる出力増強も示した。

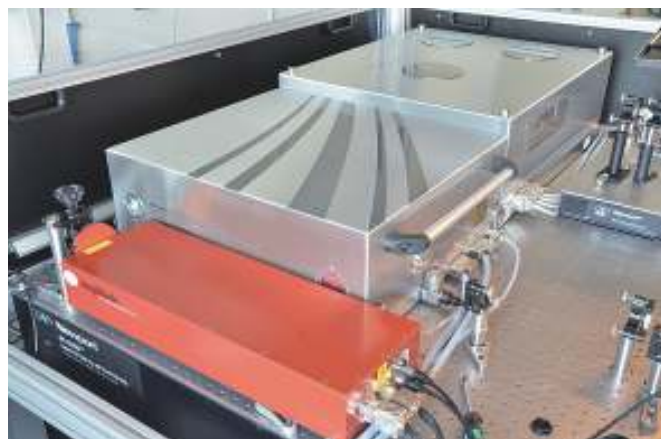
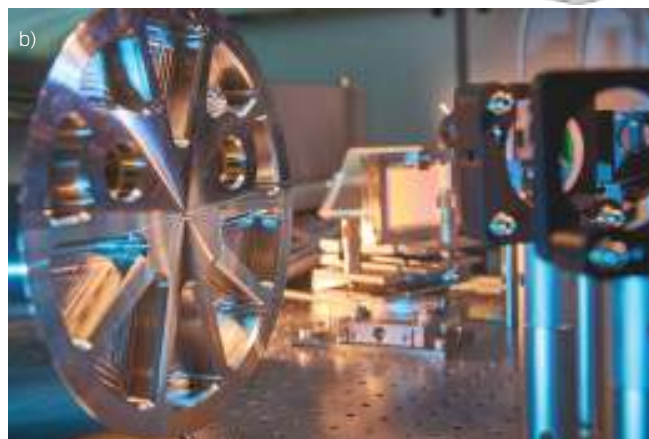
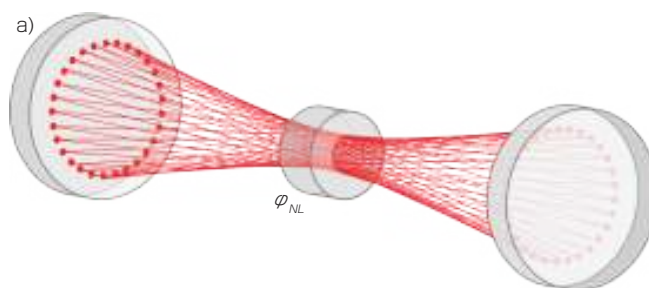


図3 イッテルビウムInnoslab主発振器出力増幅器(MOPA)の構成は、商用フェムト秒シーダー(左)、500Wパワー増幅器(中央)、515nmまでの周波数コンバータ(右)。

図4 マルチパスセル(MPC)コンセプトは、内部非線形媒体(a)を持つヘリオットセルに基づいている。ガス充填MPCの写真も示している(b)。

レーザビーム用に2つの光学面が反射防止コーティングされている。結晶は、その2つの大きな面に設置され、冷却される。4つのコーティングされていない面は、寄生レーザを抑制するために研磨されている。

その結晶は、高アスペクト比の長方形断面でエンドポンプされている。これは、y軸方向では結晶の一部のみを満たし、x軸方向では全幅を満たす。この形状は、レーザダイオードバーの放射特性に一致している。励起利得量と大きな冷却設置面の間の短い距離により、効率的な熱除去が可能になる。一次元の熱流量が、均質な円筒熱レンズを達成し、複屈折による偏光解消を回避する。

より高いパワーレベルを達成するために、結晶サイズを拡大することができる(図2)。別のオプションは、標準的な構成要素でできた増幅器チェーンの配置である(図1)、これは2012年に0.6psパルス、1.1kW出力となった。CAPSプロジェクトの新しいシステム的设计は、シングル増幅器からの2kW出力である。次の2年で、フラウンホーファー

ILTのチームは、2つの増幅器を利用してそのシステムを5kWまで拡大する計画である(図3)。最終的に、目標は、ディスクベースパワー増幅器段を使い、これを二倍の10kWにする。

このセットアップに加えてチームは、さらに短パルス化するために、マルチパスセル(MPC)を用意した。これは、非線形媒体として固体媒体またはガスに光学的に基づいている。ガス充填ヘリオットセルで、チームは、590から30fsまでパルス低減を実証した(図4)。その短パルス化プロセスは、非常に効率的であり、エネルギー損失は5%以下である。500kHzで1mJエネルギーに過ぎない圧縮パルスは、平均パワー530Wになる(4)。このコンセプトは、高い平均パワーレベルでパルスエネルギーとパルス幅というTi:Sapphireのような性能、Yb:YAGレーザの高効率を達成している

ファイバコンセプト

CAPSプロジェクト内のファイバ増幅器は、ファイバレーザ経験に立脚している。これは、フラウンホーファー

IOFと独フリードリヒ・シラー大の応用物理学研究所との密接な協働によって得られたものである。そのファイバ増幅器システムは、CW動作で4.3kWシングルモード出力を含む、多くの記録を達成した(5)。

よく知られているファイバ増幅器の主要セットアップ(図5)。シード発振器からのパルスを伸ばし、増幅し、再圧縮する。この方法の実際の限界は、有害な非線形効果の影響とファイバの損傷しきい値によるものである。増幅されたビームは、ファイバコアに収まらなければならない、これは多年にわたりフラウンホーファーIOFのファイバレーザグループが追求してきた方向である。

そのパフォーマンスを単一開口ファイバの限界を超えてさらにもっと拡大するには、新しいアプローチが必要になる。1つのソリューションは、ビームを多数の複製に分けることである。これらが増幅され、同時に強度が臨界値以下に維持されると、次に1つのビームにコヒーレントに再結合される。

しかし、事実上の課題は、コヒーレント再結合にある(6)。この方法では、直線偏光ビームが、垂直偏向の2つのビームに分けられる。増幅後、偏光ビームスプリッターを使い、そのビームは分離されたのと同じ方法で再結合される。この方法は、再結合に完全な空間的、時間的オーバーラップを必要とする。従って、すべてのビームが、能動位相安定化システムを持つ。

その方法は良く機能し、結合効率97%を達成し、しかも2つの利点がある。まず、部分ビームの数に限界がない、2つ目に増幅スキームは、利得媒体のアーキテクチャとは独立である。

古いセットアップは、3.5kW平均パワーを生成するために4つの増幅器ラ

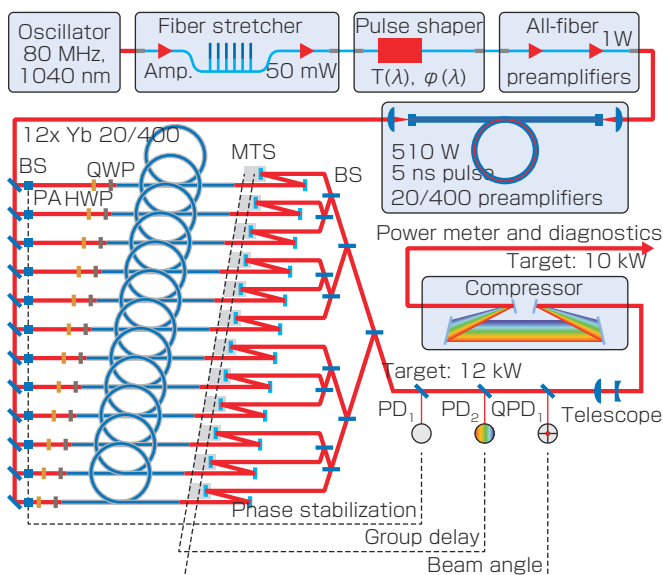


図5 10kWファイバ増幅器の主要なセットアップ。

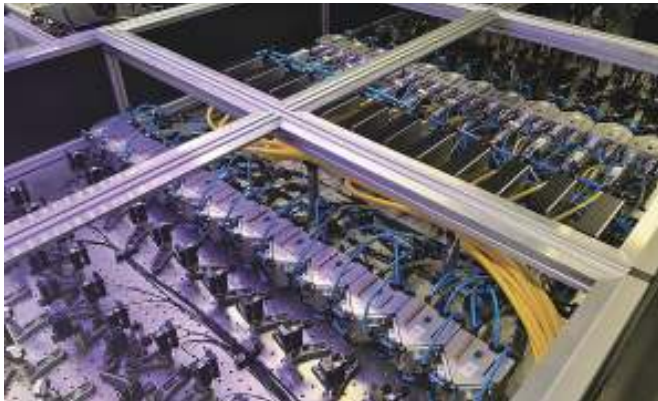


図6 新しいファイバ増幅器は、12本の独立したファイバを用いて総出力10kWを生成する。

インを利用したが⁽⁷⁾、新しいアップグレードシステムは、12本のパラレルファイバベースである(図6)。最近のテストでは、シングルモード放射で平均パワー8.9kWを達成し、ビーム品質はM2<1.2だった

10kWを上回る方向でさらなる最適化が、2020年早期に計画されている。圧縮パルスは、250fsのパルス幅である。それに続くモジュールで少サイクルパルスへ短パルス化、あるいは多くのアプリケーション向けに関心のあるスペクトル領域に変換できる、テラヘルツから軟X線までの範囲である。

この光源は、フラウンホーファーIOFの研究所でアプリケーション実験のための別のフラウンホーファーチームに使えるようになる。この研究所では、高エネルギーパルスを20から90eV(60から13nm)の超短極紫外パルスに変換するレーザーシステムがさらに増えることになる。

アプリケーション開発

すでに述べたように、適切なプロセス技術の開発と平行して光源はさらに開発される。アプリケーションラボは、複数のビームソース、広範な診断、一連のビームで技術を提供する。

CAPS コラボレーションの13パートナーのほとんどが、これらの新しい

USP レーザ光源のアプリケーションに取り組んでいる。その活動は、4つのテーマグループに組織されている。

システム技術とコンポーネント。 実際のハイパワーレーザー開発の他に、このグループは、超短パルスの分配、変換、シミュレーション、計測のための技術に集中している。

プロダクション。 CAPS プロジェクトの最終的な野望は、USP レーザシステムを、高スループットで大規模製造工程に導入することである。太陽電池のテクスチャリング処理、あるいはバッテリーの製造におけるアプリケーションは、アイデアの一部であるが、これらは新しいレーザーで開発される。

イメージング。 強力なレーザー放射をコヒーレント赤外またはEUVビームに変換することで、新しい効率的なイメージングプロセスが可能になる。用途は、技

術的またはバイオメディカル材料の非破壊分析。さらに短い波長は、レーザー駆動コンプトンソースで達成可能である。

材料。 10から20kWのUSP レーザにより、完全に人工的な材料の効率的製造が可能になる。付加的オプションは、窒素欠陥(NV)ダイヤモンドなど量子技術向けの材料の研究にある。

展望

CAPSは、現在13パートナー研究機関で、新世代の高平均パワー USP レーザシステムの開発に着手している。共同研究は、サブピコ秒レーザーパルスの数キロワットを生み出すファイバベース及びスラブベース増幅器で、2つのアプリケーションラボを使用している。レーザー光源と並行して、放射の効率的な利用のためにビームデリバリー技術が開発されている。パートナーが幅広い新技術を開発し、その意欲は実際に、USP レーザを現在のCWファイバレーザー+USP レーザ固有の特徴を持つツールにすることである。これには加工される材料にほとんど、あるいは全く依存しない高精度も含まれる。CAPSユーザーファシリティは、産業界からの新しいアプリケーションのテスト及びデモンストレーションにも開かれている。さらなる情報は、CAPSホームページ参照(www.caps.fraunhofer.de)。

参考文献

- (1) J. Finger et al., Adv. Opt. Technol., 7, 3, 145-155 (2018).
- (2) A. Thoss and J. Finger, "High throughput USP laser micromachining," Industrial Laser Solutions (Jan/Feb. 2020); <http://bit.ly/ILSRef2>.
- (3) P. Russbueldt et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 21, 1, 3100117 (Jan/Feb. 2015).
- (4) P. Russbueldt et al., Opt. Lett., 44, 5222-5225 (2019).
- (5) T. Schreiber, A. Tünnermann, and A. Thoss, Laser Focus World (2017); <http://bit.ly/LFWRef5>.
- (6) E. Seise, A. Klenke, J. Limpert, and A. Tünnermann, Opt. Express, 18, 26, 27827 (2010).
- (7) M. Müller et al., Opt. Lett., 43, 24, 6037-6040 (2018).

著者紹介

ディーター・ホフマンは、フラウンホーファーレーザー技術研究所部門長、イェンス・リンバートはフリードリヒ・シラー大の物理学教授、ファイバ&導波路レーザー部のリーダー、アンドレアス・ソスは、THOSS MediaのCEO、Laser Focus World 欧州寄稿編集者。e-mail: th@thoss-media.de