産業用フェムト秒レーザと材料加工

ノーマン・ホジソン、マイケル・ラハ、トニー・S・リー、ハティム・ハロイ、
アルブレヒト・シュタインコフ、セバスチャン・ヘミング

フェムト秒レーザ加工の背景

この5年間で、300 ～ 900fsの範囲のフェムト秒パルスによる材料加工が急速に広く利用されるようになった。熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）が小さく、非常に高いパルス強度によって、エネルギーが深くまで侵入するためである。産業用超短パルス（USP：Ultra Short Pulse）半導体励起固体（DPSS：Diode Pumped Solid State）レーザやファイバレーザは現在、フラットパネルディスプレイ用の薄膜切断、ステントの切断、燃料インジェクタノズルの穴あけ、ウエハスクライビング、表面微細構造形成に用いられている。

フェムト秒レーザパルスが初めて産業用微細加工に適用されたのは、1990年代終盤のことである。チタンサファイア増幅器（Ti:Sapphire Amplifier）が、集積回路作製におけるリソグラフィマスクのリペアに使われた。当時、産業用レーザ光源としては、パルス幅が数十nsのQスイッチNdドープ固体レーザか、パルス幅が100fsで、波長400nm、繰り返し周波数1kHzにおける出力が0.4Wの超短パルスチタンサファイア増幅器かのいずれかしか選択肢がなかった。基板にまで熱損傷が及ぶため、溶融石英基板上のクロム層の微細な形状には、ナノ秒パルスを適用することができなかったためである。熱影響部を小さくすることが不可欠であったことから、当時およそ30万ドルの高額なチタンサファイア増幅器が利用された。

現在では、多数の異なるフェムト秒レーザが提供されており、出力パルスエネルギーは最大200μJ、平均出力はkWレベルにも及ぶ。特にこの10年間で、さまざまな種類のフェムト秒固体レーザとファイバレーザのアーキテクチュアが材料加工の分野に投入されており、そのすべてがイッテルビウムドープのゲイン材料をベースとしている。産業用途には現在、最大100Wの平均出力、300 ～ 900fsのパルス幅、最大2MHzの繰り返し周波数が適用されている。当初のチタンサファイア増幅器システムと比べると、出力が2ケタ増加した一方で、システムコストは大幅に低下している。

フェムト秒レーザ低出力モデルの大多数は、眼科用途として導入されている。2000年代にはNd:ガラス再生増幅器が、レーシック手術において角膜の内側に気泡層を生成して角膜フラップを切開するために用いられた。その後、より低いコストでより高い繰り返し周波数を達成するYb:ファイバMOPAシステムが、用いられるようになった。フラップ切開に必要な標準パルスエネルギーは2 ～ 4μJで、繰り返し周波数は50 ～ 200kHz、パルス幅は約300fs

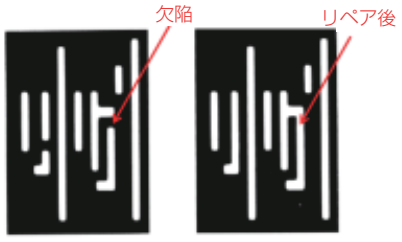

図1　パルス幅100fs、波長400nmのチタンサファイアレーザを用いたリソグラフィマスクのリペア。溶融石英基板上のクロム層のアブレーションが行われている。加工線幅は750nm[1]。

表1　2016年時点の材料加工用フェムト秒レーザとピコ秒レーザの売上高予測。2014年と2015年の値は実績値で、フェムト秒レーザには眼科用レーザが含まれる[2]。

材料加工	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2015～2019年のCAGR
フェムト秒レーザ							
売上高（単位：百万ドル）	$131.5	$148.3	$166.4	$186.2	$208.5	$233.8	12.1%
ピコ秒レーザ							
売上高（単位：百万ドル）	$154.2	$136.2	$155.0	$175.4	$198.9	$226.1	13.5%
合計							
売上高（単位：百万ドル）	$285.6	$284.5	$321.3	$361.6	$407.4	$460.0	12.8%

出典：ストラテジーズ・アンリミテッド社2016年

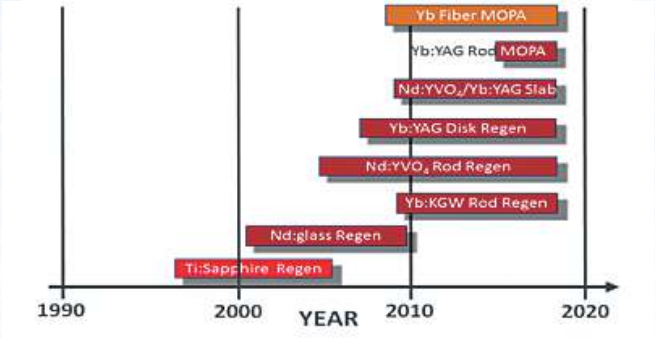

図2　微細加工分野におけるフェムト秒レーザ導入の進化推移。マスクリペア用のチタンサファイア再生増幅器はピコ秒Nd:YVO_4レーザに、Nd:ガラス再生増幅器はフェムト秒Ybファイバ MOPAに置き換えられた。

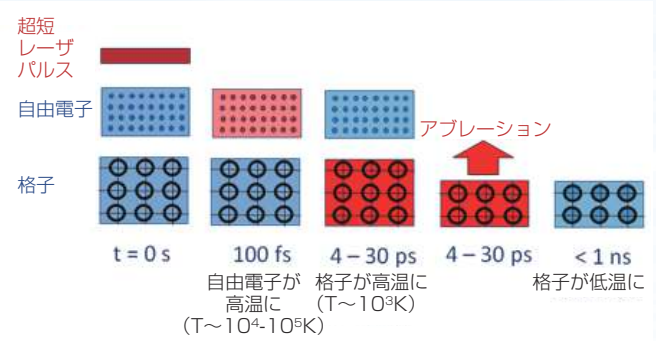

図3　超短パルスと金属の相互作用。自由電子がレーザ光を吸収することにより、100fs以内に電子の熱拡散が生じる。格子は4～30ps遅れて加熱される。

が用いられている。さらに最近になって登場した眼科用途として、白内障手術におけるレンズ切開がある。この用途では、50～100kHzの繰り返し周波数で20～40μJのパルスエネルギーが適用され、パルス幅は800fs未満であることが望ましい。

米ストラテジーズ・アンリミテッド社（Strategies Unlimited）の2016年の予測[2]によると、材料加工（眼科用途を含む）に使われるフェムト秒／ピコ秒レーザの2019年の市場規模は、4億6000万ドルになる見込みだという。その売上高の半分は、マイクロエレクトロニクス製造に広く採用されているピコ秒レーザによるものである。残り半分は、眼科用フェムト秒レーザ（1億3600万ドル）と材料加工用フェムト秒レーザ（9800万ドル）に二分される。

フェムト秒レーザ加工のメカニズムとメリット

フェムト秒／ピコ秒パルスと物質の相互作用は、電子による光吸収とそれに続く格子へのエネルギー移動に基づく。たとえば金属の場合、自由電子の温度が数万°Cにまで上昇し、光子が自由電子に吸収される。その電子は、電子・フォノン衝突緩和時間内にそのエネルギーを格子に移動する。衝突緩和時間は、室温でほとんどの材料場合100fs～1psの範囲である。格子は電子の約100倍の熱容量を持つため、レーザパルスが入射してから格子が融点に達するまでにかなりの遅れが生じる（**図3**）。レーザフルーエンスが高い場合、加熱材料のアブレーションは、レーザパルスが吸収されてから数十ps後に生じる。

超短レーザパルスの光と物質の相互作用は、電子・フォノン衝突緩和時間における、自由電子と格子の温度の時間的および空間的変化を示したTwo-Temperature Modelによって数学的に表すことができる[3]。このモデルは数十年間にわたって、超短パルス加工の損傷しきい値フルーエンス、アブレーションレート、熱影響部を計算するための非常に有効な手段として利用されてきた（**図4**）[4]～[8]。主要な結果として、10ps未満のパルスでは損傷しきい値フルーエンスは一定だが、パルス幅がそれよりも長くなると、波長に関係なく、パルス幅の平方根に比例してしきい値フルーエンスが増大することが明らかになっている。

同様に、パルス幅が10ps未満の場合は熱影響部が一定で、こちらもレーザ光の波長には依存しない。この挙動の基本的な理由は、格子の温度上昇と材料への熱伝導に遅れが生じることからであり、レーザパルスの照射時は格子が低温状態を維持しているため、この相互作用はコールドアブレーションと呼ばれている。しかし、アブレーションを引き起こすために材料は最終的には融点に達する必要があるため、この名称にはやや語弊があるかもしれない。

超短パルスの相互作用による最も興味深い効果は、パルス幅が短いほど、

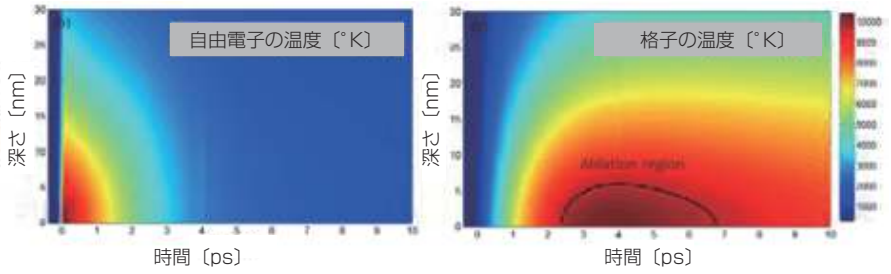

図4　銅に対して、平均フルーエンス0.14J/cm^2、波長800 nmのパルスを100fs照射した後の、自由電子（左）と格子（右）の時間に伴う温度分布の計算結果[7]。

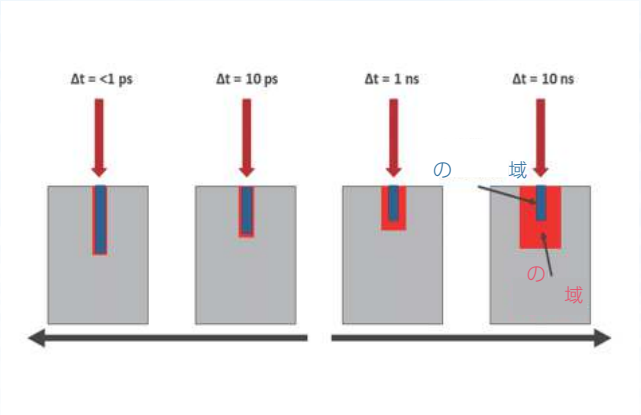

図5　媒体によるレーザパルスの吸収。青色はエネルギー侵入、赤色は熱伝導による加熱領域を示している。

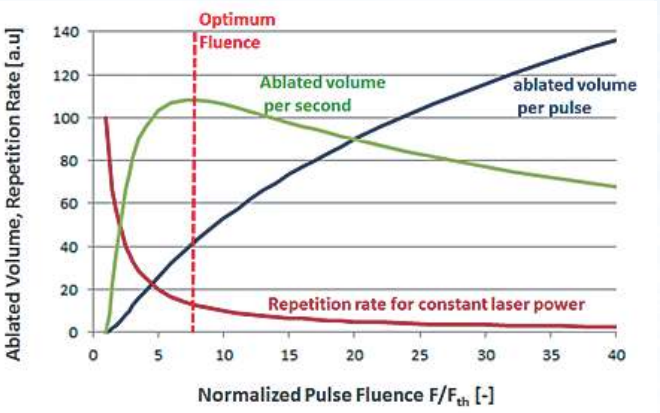

図7　レーザ出力が一定である場合の、パルスあたりアブレーション体積（青色）と１秒あたりのアブレーション体積（緑色）のグラフ[10]。

エネルギー侵入深さとアブレーション深さが増大することである。一定のエネルギーフルーエンスでパルス幅を短くすると、自由電子の温度がより早く上昇し、それと同時に電子・フォノン緩和時間が長くなる。

もう少しメカニズムを見ることで、この現象が容易に理解できるかもしれない。フェムト秒パルスは非常に強度が高いため、格子内を移動する電子の速度は10万m/sにも達する可能性があり、この高い速度によって、電子は格子にエネルギーを遷移させることなく、格子のより深くまで侵入する[8]。

材料加工の効率と品質は、レーザパルス幅に依存する。ナノ秒レベルのパルスの場合は、レーザ光の直線的な光吸収深さによってレーザパルスの吸収が決まり、材料への熱伝導によってエネルギーが消費される。それに対し10ps未満のパルスの場合は、初期エネルギー侵入が光強度に大きく依存するため、フェムト秒パルスで侵入深さが大きくなるのはそのためである。また、パルス照射時と格子加熱時に熱伝導がないことから、熱影響部は非常に小さくなる。金属の場合で、5μm未満のHAZが達成可能で、プラスチック材料の場合は、HAZは一般的に30～50μmとなる。

パルス幅が短いほど侵入深さが増大するため、（**図6**のアルミニウムの例のように）パルス幅が約20psよりも短くなると、最大アブレーションレートは増加する。後ほど説明するが、任意のパルス幅に対し、アブレーションレートが最大になるのは、パルスフルーエンスがアブレーションしきい値フルーエンスの約7.5倍の時である。パルス幅が数十nsのQスイッチレーザパルスと比べると、材料内の電子速度の増加によって、ピコ秒未満のパルスでもその3分の1のアブレーションレートが得られる。

パルスレーザの場合、パルスエネルギーフルーエンスがしきい値フルーエ

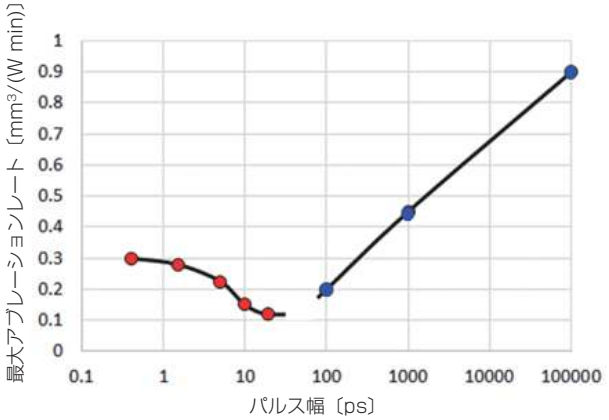

図6　筆者らの測定値（赤い点）と、ブライトリングらによって公表されているデータ[9]からの値（青い点）による、アルミニウムの最大アブレーションレート。

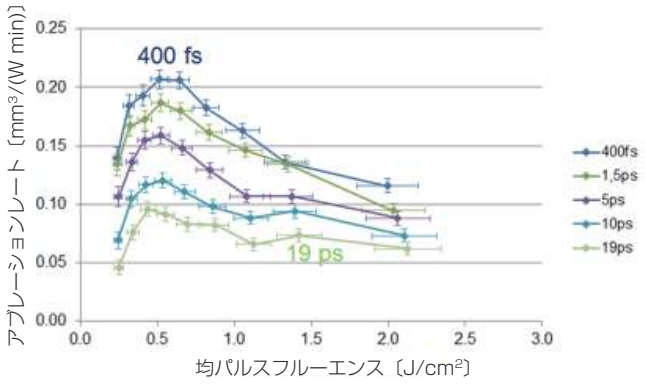

図8　1035nmにおけるニチノールのアブレーションレート測定値を、平均パルスフルーエンスの関数として表したグラフ。パルス幅を変えて、測定を行った。

ンスのe2倍に等しい時に、アブレーション効率は最も高くなる。これは、パルスフルーエンスの増加とともにアブレーション体積が飽和状態に達するためである。つまり、出力が固定の場合、エネルギーフルーエンスを下げればより多くの体積をアブレーションでき、それと同時にパルス繰り返し周波数が増加するので、スループットが上がる（**図7**）。アブレーションレートC（単位：$mm^3/W/分$）は、次の式で表される[10]。

$$C=\frac{60\delta}{F}\left(ln\left[\frac{F}{F_{th}}\right]\right)^2$$

ここで、Fはピークフルーエンス（単位：J/mm^2）、Fthはピークしきい値フルーエンス、δはパルスあたりの侵入深さ（単位：mm）である。パルスあたりのエネルギー侵入深さの標準値は、金属、半導体、プラスチックの場合で20～100nm、ガラスや透明結晶の場合で500nm以上である。

図8は、さまざまなパルス幅について、ニチノールのアブレーションレート測定値を、平均パルスフルーエンスの関数として表したものである。ニチノールはステントの製造に用いられ、スループットを高めるためにフェムト秒レーザを必要とする。1035nmのモードロックMOPAファイバレーザを使用し、コンプレッサの設定を変更することによって、異なるパルス幅を実現した。外部に第2および第3高調波発生ステージを追加することにより、517nmと345nmの波長を生成することができる。20μmのスポット径で、どちらの方向にもスポットの60%が重なるようにして、約0.5mm×1.5mmの矩形領域を約200μmの深さまでアブレーションした。パルス幅を400fsまで短くすると、19psの場合と比べてアブレーションレートは2倍になった。

表2　パルス幅400fs、波長1035nmレーザで測定した、最適な標準パルスフルーエンスと最大アブレーションレート。

	Optimum Ave. Fluence at 400fs Pulses and 1035nm（J/cm^2）	Maximum Ablation Rate at 400fs and 1035nm（mm^3/min）
スチール	0.35	0.22
ニチノール	0.6	0.21
アルミニウム	1.0	0.30
銅	1.7	0.16
Si	1.3	0.16
SiC	0.7	0.13
PET	0.7	8.0
溶融石英	3.0	0.40
サファイア	4.0	0.30

フェムト秒パルスのアブレーション効率がこのように高まるのは、金属と半導体に共通する性質である。しかし、透明誘電体材料の場合は、ピコ秒パルスの方がアブレーションレートは高くなる。これは自由電子が存在せず、材料のアブレーションに高いしきい値フルーエンスが必要になるためである。

フェムト秒レベルのパルス幅では、ピーク出力が高すぎる場合、生じたプラズマが障壁となって、アブレーションレートが抑制されることにもつながる。

アブレーションレートはレーザ波長によって異なり、材料の吸収スペクトルに依存する。一般的には、材料が入射波長においてすでに線形吸収を有す

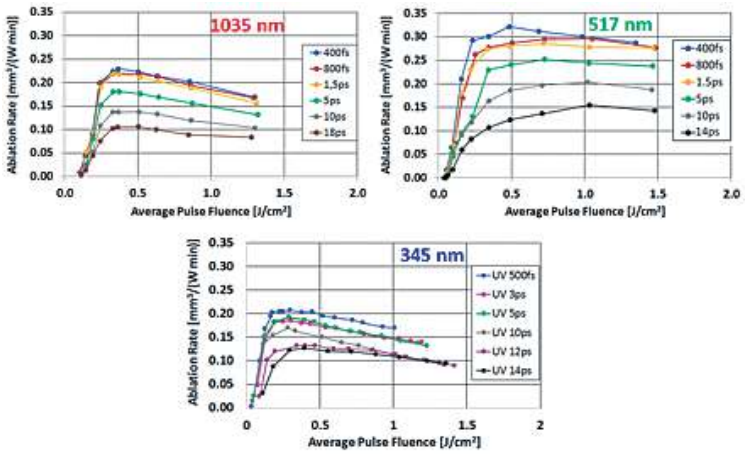

図9　さまざまな波長において測定したスチールのアブレーションレートを、エネルギーフルーエンスとパルス幅の関数で表したグラフ。

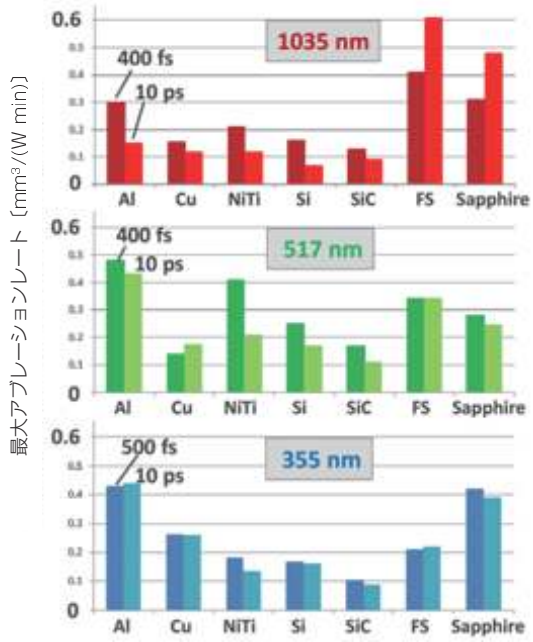

図10　IR、緑色、UVの各レーザ波長において、さまざまな材料の最大アブレーションレートを測定した結果。IRと緑色レーザでは10psと400fs、UVレーザでは10psと500fsの2種類のパルス幅を適用した。

る場合に、アブレーションレートは高くなる。

図9は、赤外線（IR）、緑色、紫外線（UV）レーザによる、スチールのアブレーションレートを示したものである。517nmレーザのアブレーションレートはIRレーザよりも50％高いが、外部共振器によるSHG（第2高調波発生）によってIRレーザを緑色光に変換する過程で、レーザ効率は2分の1に低下する。緑色発振とUV発振の標準的な変換効率がそれぞれ50%と30%であることを考えると、高調波波長の使用によってアブレーションレートの絶対値が増加する材料は多くない。例外は、緑色光波長におけるアルミニウム、ニチノール、金である。また、プラスチック材料（PET、有機ELフィルム、偏光板など）は、UV光によってアブレーションレートが増加し、切断品質が向上する。それ以外のすべての材料については、高調波波長を使用することの最大のメリットは、レイリー範囲（Rayleigh range）が広くなることで、それによって、被写界深度の増加またはカーフ幅の縮小という効果が得られる。

3つの異なるレーザ波長について、10psと400fsのパルスによるさまざまな材料の最大アブレーションレートを比較した結果を、**図10**に示す。波長によってアブレーションレートに差が生じたが、その差は比較的小さく、それよりも集光条件と材料の線形吸収によって、どの波長を選択するべきかが決まる。ただし、透明材料は例外で、パルス幅が数十psの赤外線レーザ波長が必要である。

標準的なアブレーションレートは約0.2mm³/（W min）で、例えば100Wの出力をもつレーザならば、米国の10セント硬貨に相当する体積を、約22分間のレーザ照射時間でアブレーションできるということになる。

バーストモードによるスループットの改善

超短パルスレーザによる材料加工の課題の1つは、低い平均パルスフルーエンスで最大アブレーションレートが達成されることである。**表2**は、さまざまな材料の最適な（最大アブレーションレートが達成される）平均パルスフルーエンスの測定値をまとめたものである。ガラスと透明結晶を除き、最適なフルーエンスは1J/cm²以下である。

しかし、この低いフルーエンスの最適値（すなわちアブレーションレートの最適値）の達成は、実際には難しい。例えば、繰り返し周波数が500kHzで

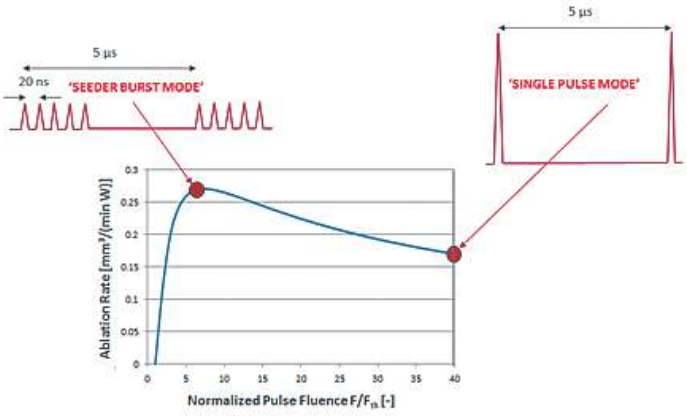

図11　200kHzのシングルパルスの代わりに5発のシードパルスを用いることによって、一定レーザ出力におけるアブレーションレートを最適値に近づける。

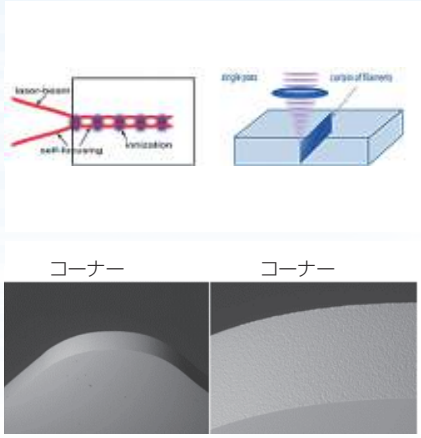

図１２　プラズマによる自己収束と発散によって、材料内部に長いフィラメントを形成することにより、レーザフィラメントによるガラス切断加工が行われる。フィラメントを近接して配置することにより、表面粗さが0.3μm rms未満の滑らかな切断面が得られる。

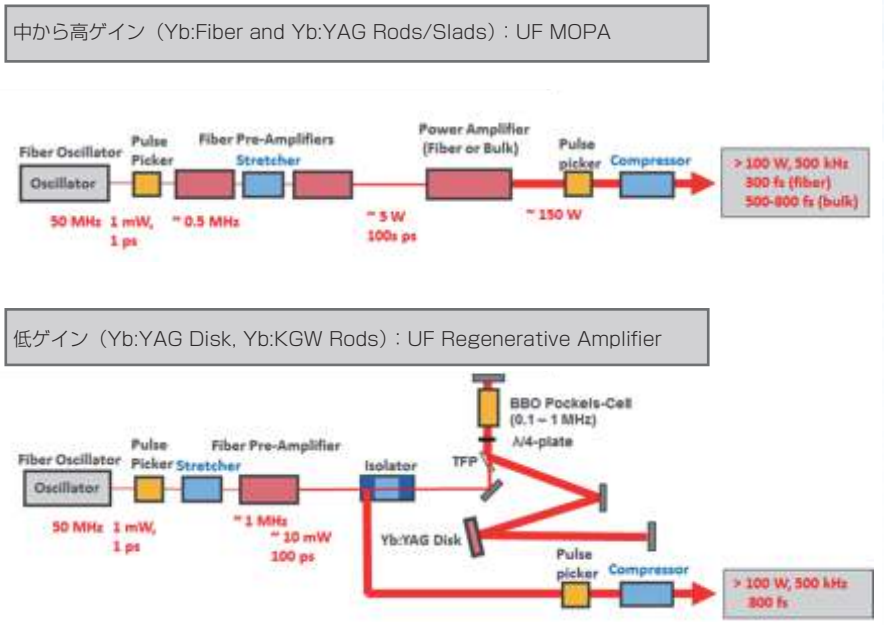

図１３　産業用フェムト秒レーザに用いられる２つのレーザアーキテクチュア。上は、ファイバ、スラブ、マルチロッドシステム用のMOPAで、下は、低ゲインシステム（ディスクやシングルロッド）用の再生増幅器。どちらのアーキテクチュアにもCPAが採用されている。

出力が50Wのレーザを、30μmのスポット径に集光すると、加工面における平均エネルギーフルーエンスは14J/cm^{2}となる。この高いフルーエンスで照射すると、アブレーションレートが大幅に減少するとともに、HAZが大きくなる。パルスフルーエンスの増加に伴ってHAZは増大するためである。フルーエンス最適値に近づけるには、レーザを3～5倍大きなスポット径に集光するか、繰り返し周波数を10～20倍にするかのいずれかだが、前者は微細加工を行なうには大きすぎるし、後者は現行の多くのスキャナと組み合わせることが難しい。

この問題に対する解決策は、シーダーバーストモードによる加工である。シーダーバーストモードを理解するにあたり、産業用超短パルスレーザはすべて、モードロックシードレーザをベースとしていることを思い出してほしい。モードロックシードレーザは一般的に、約50MHzの繰り返し周波数で動作する。（前述の例のように）500kHzの最終出力を生成するには、パルスピッカーによって100発ごとに1発のパルスを取り出して増幅し、

表３　実用化されている産業用フェムト秒レーザの動作パラメータ。３つすべてのシステムで、kWレベルまでのパワースケーリングが可能だが、現時点では最大で100Wまでの出力しか使用されていない。

	Yb:YAGスラブ/ロッドMOPA		Yb:ファイバMOPA		YBディスク再生増幅器	
使用出力（M^2<1.3）	>100W		>100W		>100W	
繰り返し周波数	0.001-50MHz		0.001-50MHz		0.001-1MHz	
最小パルス幅	500fs		300fs		800fs	
シーダーバーストモード	あり		あり		制限あり	
実証されているパワースケーリング能力	増幅器の追加によりkW超		複数のロッドファイバによりkW超		複数のディスクによりkW超	

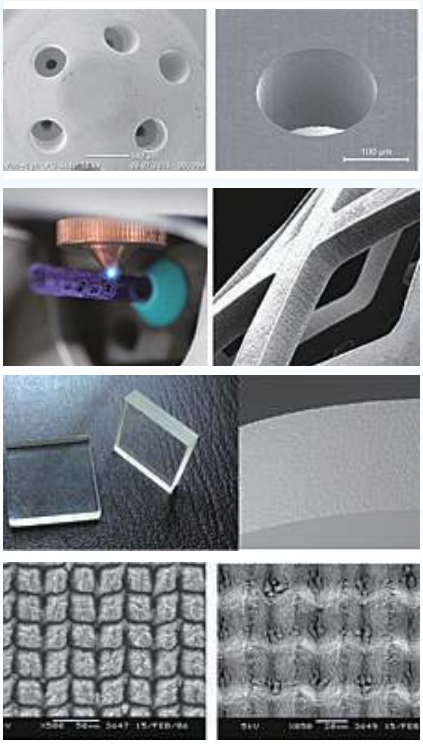

図14　フェムト秒レーザの産業用途。上から順に、インジェクタノズルの切断、ステントの切断、ガラスフィラメント切断、金属のマイクロテクスチャリング。

残りのパルスは破棄する。

シーダーバーストモードの1つの実装方法として、100発ごとに1発のパルスを取り出す代わりに、約20ns間隔の3～10個のパルスからなるパルストレインを利用するものがある。その結果、レーザ出力を一定に保ったまま、個々のパルスフルーエンスはN分の1に低下する。Nはバースト内のパルス数である（**図11**）。これによって1秒あたりのパルス総数を最大で1000万個にもすることができるため、最適フルーエンスまたはそれに近い値で動作して、アブレーションレートを大幅に増加させることができる。また、パルス間隔が十分に広いので、金属や半導体において、格子は次のパルスが照射されるまでに初期温度に戻り、それぞれのパルスは再び低温状態の加工対象物に照射されることを思い出してほしい。このことは、大半のガラスについても当てはまり、加工対象物は10ns以内に「低温」状態に戻る。

深いトレンチ加工をする場合、バーストモードは異なる効果をもつ。生成されたプラズマは逃げ場がなく、後続のパルスがプラズマに吸収されることによって、個々のレーザパルス間に相互作用が生じる[11]、[12]。この効果は、ピコ秒／フェムト秒レーザによるレーザフィラメントのガラス切断加工に用いられる。プラズマ生成後の自己収束と発散のバランスによって、直径数ミクロンの長いフィラメントプラズマが形成される（**図12**）。プラズマの継続時間は30ns程度であるため、シード周波数が40MHz以上のシーダーバーストモードにより、次のレーザパルスが前のレーザパルスによって生成されたプラズマと相互に作用し、材料内部で収束と発散の長い繰返しが生成される。このレーザフィラメントを繋げることにより、厚さが最大5mmのガラスを、毎秒数メートルの速度と0.3μm RMS未満の表面粗さで切断することができる。フィラメントを用いた切断加工は、自動車業界や航空業界で、窓ガラスやミラーガラスの切断に採用されている。

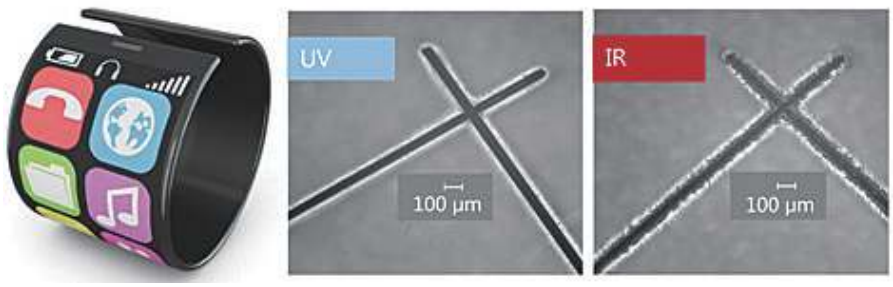

図15　ピコ秒／フェムト秒UVレーザは、有機EL薄膜の切断に使われている。紫外波長は、赤外線レーザパルスと比べてHAZが小さく、プラスチック薄膜をクリーンに切断することができる。

バーストモードを備えた信頼性の高い超短パルスレーザの設計

あらゆる産業用フェムト秒レーザ増幅器がYbドープの結晶またはファイバをベースとするが、採用するゲイン材料のジオメトリに応じて、2種類の異なる増幅器アーキテクチュアが用いられている（**図13**）。ファイバ、スラブ、マルチロッドシステムをベースとする増幅器の場合は、パスあたりのゲインが十分に高いのでMOPAアーキテクチュアが用いられる。このアーキテクチュアにおいて、出力がファイバの場合で数十mW（スラブとロッドの場合で数W）、繰り返し周波数が約50MHzのシードレーザから、パルスがピックされ、100W以上に増幅される。MOPAアーキテクチュアは、最大数十MHzの高い繰り返し周波数で動作できること、シーダーバーストモードの実装が簡単であること、増幅ステージの追加によってパワースケーリング（高出力化）が容易であることなど、複数のメリットがある。

Yb:YAGディスクレーザとシングルロッドを使用する増幅器の場合は、1パスあたりのゲインが低すぎてシードレーザを十分に増幅できないので、100W以上の出力を達成するために再生増幅器が用いられる。Yb:YAGディスクの場合、シードパルスは、ポッケルセルによって増幅共振器へと送られ、ポッケルセルが高エネルギーパルスを再び放射するまでに、パルスは共

振器内を約150回往復する。再生増幅器は、（ポッケルセルの応答速度に起因して）繰り返し周波数が約1MHzまでに制約され、シーダーバーストモードを実装するのは難しい。したがって、フェムト秒／ピコ秒レーザによる材料加工においては、MOPAアーキテクチュアに明らかに軍配が上がる。

増幅器アーキテクチュア（MOPAか再生増幅か）にかかわらず、すべての超短パルスレーザシステムで、増幅後のパルスの伸長と圧縮にチャープパルス増幅（CPA：Chirped Pulse Amplification）が採用されている。したがって、コンプレッサの設定を変更することにより、フェムト秒レーザによってピコ秒パルスを供給することも可能で、パルス幅の変更によって特定のプロセスを最適化する際には、明らかなメリットとなる。

米コヒレント社（Coherent）は2015年から、ファイバMOPAベースのフェムト秒レーザ製品ファミリー「MONACOシリーズ」を提供している。MONACOレーザは、平均出力最大60W、パルスエネルギー最大80μJ、パルス幅は300fs ～ 10psで調整可能である他、バーストモード動作が簡単に利用できるので、超短パルスレーザ加工に最適である。発振波長は、赤外（IR）のほか、緑色（Green）と紫外（UV）（リリース予定）が提供されている。

応用分野

現在、フェムト秒レーザは、HAZを抑えてアブレーション表面の品質を高めつつ、微小構造を作成することが求められる、さまざまな応用分野で使用されている。フェムト秒レーザの大多数は、やはり眼科用途向けだが、材料加工市場もこの数年間で2ケタ成長を示している。いくつかの主な応用例を**図14**に示す。半導体とディスプレイ市場では、フラットパネルディスプレイ用の薄膜の切断（**図15**）と薄ウエハのスクライビングに、フェムト秒／ピコ秒レーザが使われており、特に力強い成長が見られる。

フェムト秒／ピコ秒レーザ市場のうち、材料加工分野は13%の年平均成長率（CAGR）で成長し、2025年には総売上高が6億7500万ドルに達すると予測されている[2]。また、眼科用フェムト秒レーザについては2025年までに年間約2億ドル相当が販売され、CAGRは6%になると見込まれている。

その間に、数百Wに達するさらに高出力のフェムト秒レーザが産業分野に投入され、新たな超短パルス処理手法が出現するかもしれない。特に多層構造材料の切断、新しい複合材料の加工、スマートフォンのディスプレイガラスのレーザ切断などで期待される。現在、スマートフォンのディスプレイガラスは、ダイヤモンドホイールとグラインダーによって機械的に切断されている。ひとたび、ディスプレイガラス切断に対し全てレーザでの加工方法が用いられれば（これには、外縁の切断だけでなく、面取りやスピーカ、ホームボタン用の穴加工を含む）[13]、産業用フェムト秒レーザは予測されている13%を上回るCAGRで成長を遂げる可能性があるだろう。

参考文献

(1) N. Hodgson et al., Diode-pumped TEM00 mode solid state lasers and their micromachining applications, SPIE vol. 4977, 281, 2003
(2) Strategies Unlimited, Lasers & Photonics Marketplace Seminar, PennWell 2016
(3) S.I. Anisimov et al., Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses, Sov. Phys. JETP 39, 375, 1974
(4) N.K. Sherman et al., Transient response of metals to ultrashort pulse excitation, Opt. Eng. 28(10), 1114, 1989
(5) T.Q. Qiu et al., Short-pulse laser heating on metals, Int. J. Heat Mass Transfer 35(3), 719, 1992
(6) S. Nolte et al., Ablation of metals by ultrashort laser pulses, J. Opt. Soc. Am. B14(10), 2716, 1997
(7) J. Byskov-Nielsen, Short-Pulse Laser Ablation of Metals: Fundamentals and Applications for Micro-Mechanical Interlocking, PhD Thesis, Univ. of Aarhus, 2010
(8) S.-S. Wellershoff et al., The role of electron–phonon coupling in femtosecond laser damage of metals, Appl. Phys. A 69, 99, 1999
(9) D. Breitling et al., Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses, Proc. SPIE vol. 5339, 2004
(10) B. Neuenschwander et al., Optimization of the volume ablation rate for metals at different laser pulse-durations from ps to fs, Proc. SPIE vol. 8243, 2012
(11) S. Rezaei, Burst-Train Generation for femtosecond laser filamentation-driven micromachining, PhD Thesis, Univ. Toronto, 2011
(12) D. Esser et al., Time dynamics of burst-train filamentation assisted femtosecond laser machining in glasses, Opt. Express 19(25), 25632, 2011
(13) T.S. Lee, High speed glass cutting at oblique angles, Talk M701, ICALEO 2018, October 17, 2018

著者紹介

ノーマン・ホジソン博士（Dr. Norman Hodgson）は、米コヒレント社（Coherent）の技術ならびに先端技術研究担当副社長。マイケル・ラハ（Michael Laha）は、同社超短パルス産業用レーザ担当製品ラインマネージャー。トニー・S・リー（Tony S. Lee）は、同社シニアアプリケーションエンジニア。ハティム・ハロイ（Hatim Haloui）は、同社シニアアプリケーションエンジニア。アルブレヒト・シュタインコフ（Albrecht Steinkopff）はエンジニアリングインターンで、現在は独イェーナ大（University of Jena）応用物理学研究所（Institute of Applied Physics）に所属。セバスチャン・ヘミング（Sebastian Heming）はエンジニアリングインターンで、現在は独ミュンスター大（University of Münster）に所属。