

サブナノ秒レーザーによる経済的な高精度加工

半導体製造、ディスプレイ装置、マイクロ加工処理、バイオ医療などの多くの業界で材料をより微細で精密に加工する技術が進行しつつあります。これらの応用技術の中でもっとも要求が高いものは、ピコ秒領域のパルス幅を持つレーザーです。しかし、その中でも生産コストに制限がある場合、アプリケーションによっては、ピコ秒のレーザー技術は十分なスループットは提供できても、それが必ずしも経済的に見合った選択肢ではないことがあります。

パルス幅が 600 ピコ秒レンジ(サブナノ秒)の比較的複雑でないレーザー光源は、コスト上の制約を満たす一方で、用途によっては要求する加工精度に到達する例がでてきています。本稿では、この種の結果を得ることができるレーザー技術について検証し、現在の応用技術について説明します。

短いパルス幅を用いる理由

様々な各種素材を対象としたレーザーによるマイクロ加工処理においては、パルス幅が短い方がより高い空間分解能、より優れた深度の制御、エッジ品質の改善や、また熱による損傷などを最小限に抑えることができます。パルス幅を 15 ピコ秒領域まで短くすると、ナノ秒領域のパルスとは基本的にまったく異なる現象として、レーザーと材料の相乗効果により、加工結果が改善されることがわかっています。特に、ナノ秒パルスを用いた場合は、光と熱の相互作用によって、材料が熱せられて気化し、材料を除去することになります。それに対して、超短パルスレーザーは、光アブレーションによって材料を除去します。このプロセスでは、高いピークの光が多光子吸収を引き起こし、クーロン反発によって材料が爆裂し、電子を材料から引き裂きます。光アブレーションは、熱プロセスと言うよりは、材料における分子または原子の結合を直接破壊することに貢献しています。

超短パルスを発生させるシステムに多様なパフォーマンスと産業レベルの信頼性を求めると、それだけシステムが複雑になります。そのことが、プロセス能力を改善することによりメリットがある応用においても、コストがかかりすぎてしまう原因になっています。

幸いなことに、光アブレーションには充分でない 600 ピコ秒レンジのパルス幅を持つシンプルな構造のレーザーを用いても、超短パルスレーザーの多くの利点を得ることができます。これには、大きな理由が 2 つあります。

第 1 には、どの材料にもアブレーションの閾値があるという点です。つまり、材料を気化させ、除去するには、最小限のピーク強度が必要です。所定のパルスエネルギーに対して、パルスが短いほど、この閾値のパワーを超えたトータルエネルギーを提供することができ、希望の処理(切断、穴あけなど)を実現することができます。それに対して、パルス幅が長いと多くのエネルギーは、単に材料を熱することに使われてしまいます。

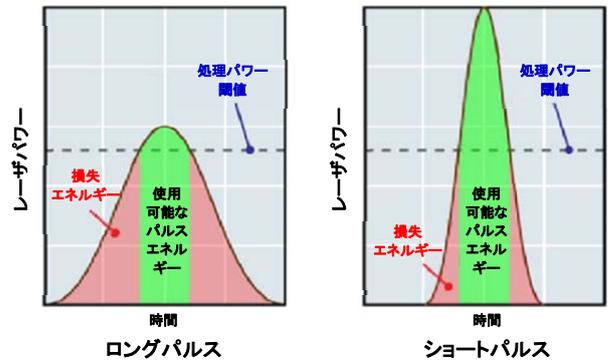


図 1. パルス幅が長いと、エネルギーの大半が熱にとられ、その熱は材料の周辺に拡散し、熱影響範囲(HAZ)として知られる損傷を生じます。パルス幅が短いとパルスエネルギーの高い割合が、出力レベルの閾値を超え、加工性を最大限に引き出す一方、HAZ を最小化します。

短いパルス幅を使用するもう 1 つのメリットは、吸収されたレーザーエネルギーが材料周辺に放出する前に除去、気化された材料とともに運び去られることにあります。この効果は、熱をよく伝える金属のような伝導体で著しく、プラスチックのような熱絶縁体では効果が少ない傾向があります。基準点として、二酸化ケイ素のような中間的な材料では、10 ナノ秒未満で熱は 1 μm に拡がります。したがって、この材料では、サブミクロン単位の HAZ に抑えるためには、10 ナノ秒より短いパルス幅が必要になります。

経済的な短パルスレーザー

パルス幅とその他の共振器パラメータとの固有の関係(表に要約)の利点を利用することで 600 ピコ秒のパルス幅のレーザーは、経済的なレーザーになりえます。特に、共振器長を短くし、一方で、繰返周波数、励起出力、キャビティロスを含む他の共振器特性を注意深く管理します。

パラメータ	パルス幅を短くする (この要因として)	出力を大きくする (この要因として)
共振器長	減少する	増大する
繰返 周波数	減少する	増大する
ポンプ光の 強度	増大する	増大する
放射断面積	増大する	増大する
キャビティの ロス	増大する	減少する

表 1. レーザ共振器の特性と出力パラメータとの関係

Coherent 社の Helios シリーズ(ダイオード励起固体レーザー)では、エンジニアがキャビティ長を最小化し、コンポーネントを極限まで短くすることを推し進めました。結果的に、効果のある数ミリのキャビティ長となり、パルス幅は約 600 ピコ秒になりました。小さな利得媒体により、この短縮された共振器の IR(赤外)発振出力は、50 kHz の繰返周波数において、わずか 1W です。そのため、マスターオシレータ出力増幅器(MOPA)が高い最終出力を得るために採用されています。小型化された 1 段アンプとの組み合わせでは平均出力 2.5W(50 μ J/50 kHz)であるのに対して、2 段のアンプ構成では、1064 nm の波長で 5W(100 μ J/50 kHz)の平均出力となります。また、この高いピークパワーにより、第二次高調波(発振周波数ダブリング)においても比較的高い出力が得られます。

特に、Helios は、波長 532 nm にて 3 W の最大平均出力(60 μ J/50 kHz)を提供することができます。増幅部とダブリングのための光学部品は、シールドされたレーザーヘッド内にモノリシックに集積化されています。これらのフリースペースレーザーは非常に小型化されていますが、キャビティの寸法に結晶のサイズを注意深く合わせており、優れたモード質の円形ビームを伝搬するようにデザインされています。標準的には、これらのレーザーは $M^2 < 1.25$ を実現しているため、高精度加工に最適です。Helios の設計上のもう一つの重要な特長は、アクティブ Q スイッチが採用されている点です。これにより、パルス幅とパルスエネルギー(ないし平均出力)の組み合わせを最適化する正確な発振周波数での動作を可能にします。

また、パルス周波数のタイミングジッターがアクティブに最小化されています。このことは、小さなスポット径で、高速にビームを操作する薄膜のスクライビング加工のような応用では特に重要です。ジッターを上手く制御できないとラインを連続して描画することができず、ギャップを生じてしまう恐れがあります。

いくつかのレーザーマイクロ加工応用で、これらのレーザーへの切り替えが行われています。理由は産業用超短パルスレーザーの利点を生かしつつ、コストが 1/10 になる場合もあるためです。

応用分野

ガラスマーキングがレーザー技術の応用として浮上してきています。ディスプレイ装置、医療器具パッケージ、容器、そして建築目的などガラスを使用する製品が増えていきます。マーキング技術によって、ガラス上にロゴ、シリアル番号、バーコードなどを刻印します。レーザーによって刻印されたマーキングがどのように見えるかはレーザーパラメータを調整することによって変えることができます。これにより、鮮やかなマーキングを製品上に実現して、製品の見た目を引き立てたり、製品のパーソナル化(個人名を製品上に刻印)を図ったり、また肉眼ではほとんど識別できないマーキングを施すことによって偽造防止に使用することができます。ガラスヘレーザーマーキングする際は、その過程でマイクロクラックを生じさせないようにすることが重要です。理由は、そのことによって材料が脆弱化し、壊れやすくなる可能性があるからです。このことは、化学処理や熱強化プロセスを通じて、スクラッチやクラックの有無がより重要になる新しい種類の強化ガラスを加工する際に、問題視されています。

この分野の最新技術がいわゆる「カラーマーキング」と呼ばれるものです。光の当たり具合によっては、このマーキングが虹色の効果を出すためです。カラーマーキングは、実際には、ガラスまたはサファイア基板の表面から数ナノメートルの材料をアブレーションするものです。ここでもまた、マーキングプロセス時にクラックを生じさせないようにして、表面の特性にスムーズな変化をつけることが重要になってきます。532 nm の波長で動作している Helios レーザはこの処理において、極めて効果的な光源であることが立証されています。また、これより長いパルス幅(ナノ秒)のレーザーでは、これと同様のクラックのない品質を得ることは困難です。Helios は、幅広いプロセスウィンドウにおいてクラックフリーマーキングを実現できます。20 μ m のビーム径、40~60 μ J のパルスエネルギーでその加工ができます。また、最適なレーザーのパラメータを選択することで、カラーマーキングの見え方を幅広い範囲で変化させることもできます。



図2: Helios(波長 532 nm)によるガラス上のカラーマーキング

また Helios は、ガラスやサファイア上に従来のマーキングを刻印したり、彫刻を施したりすることにも使用されます。この場合では、マーキングは通常、10 μm オーダーの深さで行うことで鮮明に印字ができます。特に高輝度 LED の製造において、サファイア基板にマーキングを行う例があります。これらのマーキングは、LED が構成された後、すなわち多大なコストが蓄積された状態で、通常、サファイア基板の上にロット番号や識別情報として刻印されるものです。ここで大きな課題となるのは、読み取りやすいマーキングを施すことと、同時に周囲の回路構成に悪影響を与えないことです。しかし、サファイアは硬く、しかもほとんどのレーザーの波長に対して透明なため難しい加工と言えます。これまで一部のサファイアマーキングは、ナノ秒レーザーによって行われてきました。しかし、基板にマイクロクラックを生じるため、品質は満足いくものではありませんでした。波長 532 nm の Helios を使用することで、これらのいずれの問題も解決することができます。その結果、優れた表面仕上げとともにエッジの品質も保たれ、マーキングの細かいところまでシャープさを実現し、周囲への損傷も見られません。



図3: サファイアをピコ秒のパルス幅のレーザーでマーキングした例: サファイアは極端に硬いため、他の方法では困難でした。

ガラスやサファイアのマーキング以外にも Helios は、シリコンのような脆くて繊細な材料の切断やスクライブにも用いられています。従来の機械的な方法では、それらの加工処理は困難でした。例えば、半導体のデバイス製造に用いられるシリコンをダイシングする際、切断プロセスで、重大なマイクロクラックを生じさせないことが特に重要です。Helios を用いたシリコンスクライビングは、結果としてマイクロクラックを最小限に抑えられます。そのため、ボンディングやそれ以降のプロセスの最中に、曲げ強度が低減されないため、チップ上の回路を保護します。

ガラスおよびサファイアの切断、スクライビング、穴あけなどにおいて、Helios レーザは、ナノ秒と超短パルスの双方の特長が生かされます。繰り返しになりますが、長いパルス幅に比べ、短いパルス幅の利点は、切断の優れた品質にあります。特に本製品は、パーティクルやマイクロクラックの発生が少なく、穴あけがきれいに行えます。これは以下の写真でも明らかに示されています。

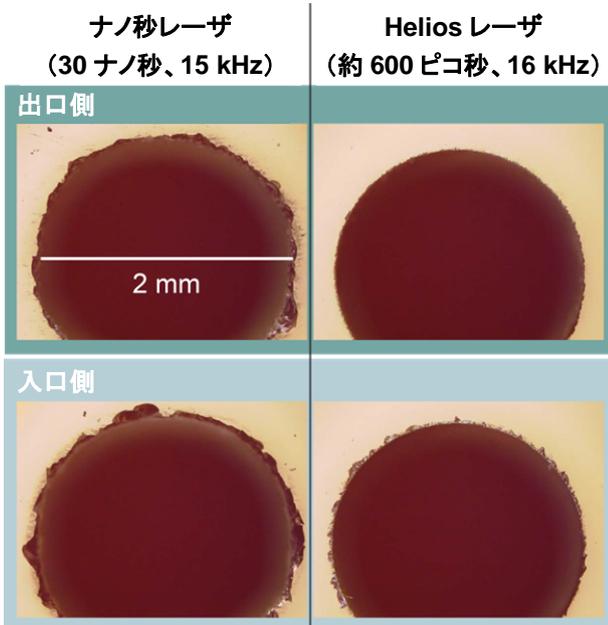


図4: 1.8 mm の厚さのガラスにナノ秒レーザーとピコ秒レーザーとで穴あけをした際の比較。ピコ秒レーザーの方が材料のより少ない変質で明らかにきれいな穴あけを実現します。

(出典 LMBT 18.01.2012:iLaCoS2012)

超短パルスレーザーと比較した場合、Helios は、より低いコストで、より厚い基板に対して、より高いアスペクト比の穴あけを実現しています。ガラスまたはサファイアをレーザーでマイクロ加工する際、表層より下側に向けて加工すると、穴の形状が先端に行くにつれて細くなる点に問題がありました。この問題については、基板の下層から上方に向けて加工を行うことで解決できます。しかし、超短パルスレーザーでのプロセス過程において生成されるとも小さなパーティクルが粘液状のスラリーを生じ、穴をふさいでしまうことがあります。Helios の長いパルス幅で加工した場合、この問題は生じていません。

Helios のもう一つの重要な応用分野は、薄膜へのスクライビング加工です。標準的な応用例は、タッチスクリーンに使用される透過率の高い導電性の酸化物や太陽電池に使用される材料へのパターン作成です。

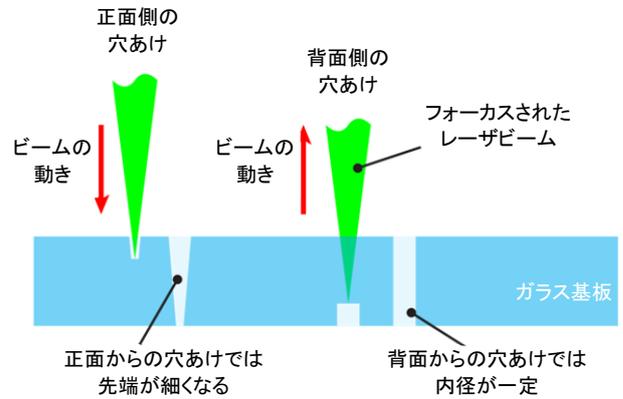


図5: Helios は比較的厚めのガラスや融解石英の基板に対して断面のきれいな、高いアスペクト比の穴あけを実現できます。

ディスプレイ装置やタッチスクリーン市場では、任意パターンを直接加工するための「スポレーション・破砕反応: (spallation)」と新しいプロセス概念が Helios や超短パルス産業用レーザーによって可能になっています。スポレーションによって、薄膜(数百ナノメートル以下)を極めて精密に下部層に損傷を与えることなく、選択的に除去することができます。しかも、スポレーションはほとんど除去後の加工残骸が発生しない単工程のドライプロセスであるため、通常、クリーニングのような後処理を必要としません。このプロセスを用いる場合、1 層目は、そのレーザー波長を透過し、2 層目の材料は、そのレーザーの波長吸収率が高いものである必要があります。このような状況で、レーザーのすべてのパルスエネルギーは 2 層目の表面深さわずか数ナノメートルレベルで吸収されず、また、この 2 層の境界面で吸収が完結するため、気化して膨張した物質の行き場がなくなります。

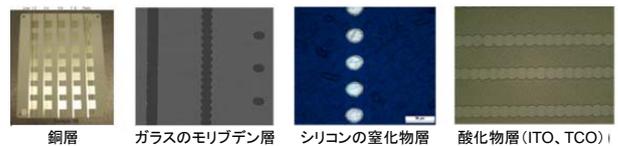


図6: Helios レーザを使用して高精度で除去された多岐にわたる薄膜の種類

その結果、この破滅的に膨張した原子化物質が、衝撃波を生み出し、より薄い層(ここでは 1 層目)の材料を吹き飛ばします。スポレーションは、周囲および下層の材料への損傷を最小限に抑えられるため、薄膜を用いるエレクトロニクスおよびディスプレイ産業で重要な装置となっています。

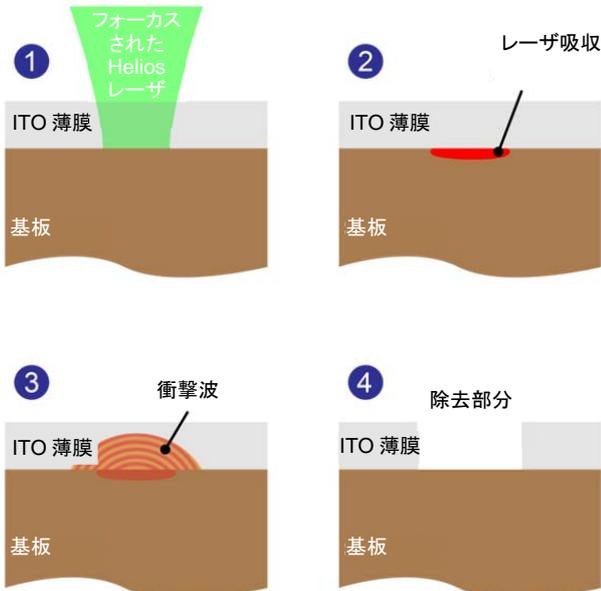


図7: スポレーションにおいて①集光されたレーザー光が1層目を透過、②2層目の表層が熱せられ、③2層間で衝撃波が増長し、④外側の薄い層が吹き飛ばされます。

結論として、サブナノ秒のパルス幅を使用している Helios は、要求の厳しい多くのレーザーマイクロ加工応用において魅力的な代替機能を提供することができます。特に、より高精度のピコ秒光源の加工品質と同様のメリットを提供できるだけでなく、それを大幅なコストダウンで実現しています。さらにサイズがコンパクトなため、幅広いシステムへの搭載が可能です。



図8: Helios 外観写真

執筆者

Oliver Haupt, Helios シリーズ 製品ラインマネージャー
Coherent Inc.