

産業用超短パルスレーザーによる超精密加工

半導体マイクロエレクトロニクス製造、ディスプレイ装置、医療機器装置製造を始めとする多くの産業界では、より高精度の加工技術が益々脚光を浴びています。特にこれは、今までより小さなサイズの部品の切断、穴あけ、マーキング(印字)などをより高精度に行うとともに、周囲の素材への影響を最小限に抑えた状態で加工することを意味します。これまで、多くの精密加工アプリケーションでは、ナノ秒パルスレーザーあるいは UV(紫外光)レーザー、あるいはその両方の技術を用いたレーザーが利用されてきました。しかし、これまでの光源では、要求度の高い新たなアプリケーションレベルには必ずしも対応できなくなっています。その結果、一部のアプリケーションでは、これらの課題に対応するため、超短パルス(ピコ秒あるいはフェムト秒)レーザーが導入され始めています。ここでは、超短パルスを用いた加工技術の利点に焦点を当てるとともに代表的なアプリケーションを紹介しします。

超短パルスを用いた加工技術の利点

理想的なマイクロ・マシニングは、穴あけ、溝加工、マーキングなどのミクロンサイズの作業を広い範囲にわたって正確に、かつ周囲の素材に熱的な損傷を及ぼさずに行うこと、言い換えれば、熱影響層(HAZ)を最小限に抑えた状態で高精度かつ、クリーンな切断とマーキングを実現することです。

材料に対してレーザーによる高精度なドリル加工、スクライプ(ミシン目)加工、切断、マーキングを行うには、基本的には 2 つの方法があります。これまでの多くのアプリケーションでは、赤外光や可視光の Q スイッチレーザーが使用され、これらはパルス幅が数 10 ナノ秒であり、光と熱の相互作用により対象物を除去します。意図的に外部光学系で集光されたレーザー・ビームは、空間的に限定された箇所への高強度な熱源となります。対象物は急速に熱せられ、結果的に気化(沸騰、蒸発)します。

このナノ秒 Q スイッチ・パルスを用いる場合の長所は、比較的大型(大量)の対象物を迅速(特に Q スイッチが通常動作する数 kHz の繰返周波数を考慮すると)に除去できる点にあります。さらにナノ秒パルスレーザー技術は十分に確立された技術であり、これらのレーザー光源は極めて信頼性が高く、所有コストも魅力的です。ただし、最も要求度の高い課題として、周辺部への熱影響による損傷(表面塗装の剥離やマイクロクラックなど)や部分的に材料が変質することが挙げられ、これらは避けることが困難です。

HAZ の範囲を最小限に抑える 1 つの方法として、可視光や近赤外光の代わりに紫外光(UV)を出力するナノ秒パルスレーザーを使用する方法があります。UV 光は、多くの材料に対し、吸収率が大きく、HAZ を軽減できます。

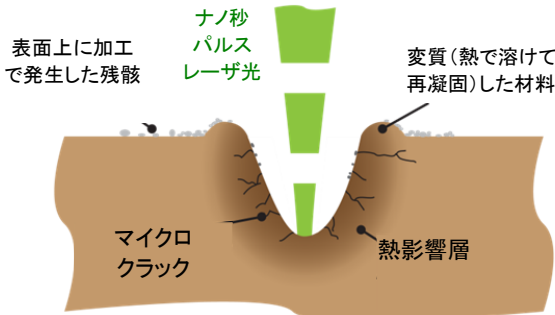
レーザーによる材料除去の 2 つめの方法は、光アブレーションをベースにしたものです。非常に短いパルス幅によって、極めて高い(メガワット以上の)ピーク出力が得られるため、超短パルスレーザーにより可能な方法です。高いピーク出力が材料から電子を引き剥がす多光子吸収を促進し、クーロン反発力によって材料が除去されます。

光アブレーションは、材料を結合構成している分子または原子レベルの結合を直接破壊するため、単なる熱加工ではなく、本質的に熱加工では無いのです。さらに超短パルスを使用すると、そのレーザーが照射した材料の箇所は極めて短時間に除去されるため、熱エネルギーがその材料の周囲に広がる時間もなく、その大半が材料の除去に使用されます。結果的にこれらの事が総合的に作用して熱影響層が著しく減少します。しかも、これらは非常にクリーンな加工であり、材料を変質させないため、厄介な後処理の必要がありません。

超短パルス加工のもう 1 つの大きな長所は、非常に多様な材料に対応していることで、線形光学吸収率が低く、故に既存の産業用レーザーでは加工が困難な様々なバンドギャップの大きい材料(ガラス、サファイア、一部のポリマー樹脂など)も上手く加工できる点にあります。より具体的には、この技術はどのような波長に対してもニュートラルであり、それはつまり、その材料がレーザーの波長において通常、透過的なものであっても非線形吸収により加工が可能であるということです。

良と言えます。これは、UV 高光子エネルギーが非線形吸収を効率よく促進するとともに、(回折により)最小集光径を作り出すことが可能であるためです。さらに UV 光の残りの線形吸収によって材料の奥深くへのエネルギーの浸透を阻止するからです。これは UV と超短パルスの利点ですが、より高出力が得られる赤外光 (IR) や可視光 (Green) のピコ秒 (超短パルス) とのバランスで考える必要があります。高出力であればあるほど、高除去率、より高生産性になります。

光と熱の相互作用



光アブレーション

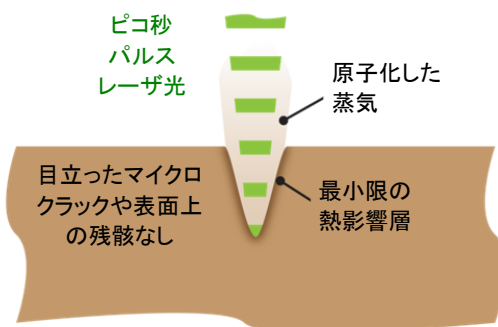


図 1: ピコ秒レーザーとナノ秒レーザーの加工比較

但し、超短パルスでの加工は、パルス幅の長いレーザーでの加工に比べて、材料の除去スピードが遅く、またコストが高いため、超短パルスでの加工は、一般的に最大限の加工精度、品質、最小限の熱影響層が要求される用途に限定して使用されることが多いと言えます。

現在、赤外波長 (IR) から紫外波長 (UV) に至るまで超短パルスレーザーが入手可能です。一般的に、超短パルス UV レーザーが高精度、最小限の熱影響層の観点から最

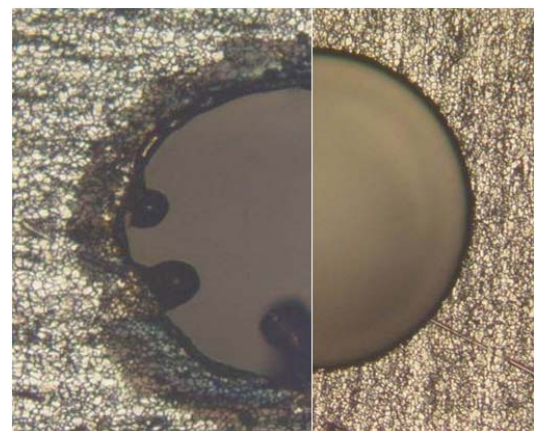


図 2: ナノ秒パルスレーザー(左)とピコ秒パルスレーザー(右)を用いた、ステンレススチール直径 200 μm 貫通穴比較。ピコ秒レーザー(右)の方が、材料の変質も少なく、熱影響層も小さい。

高付加価値マーキング

超短パルスレーザーを用いた産業用途は、特殊マーキング、マイクロ・ストラクチャリング、薄膜アブレーションの 3 つのグループに分けられます。

産業分野で広く、マーキング用途として様々な異なるタイプのレーザー装置が使用されています。多くの場合、これらの用途はレーザー装置自体の価格やマーキング文字あたりのコストなど、非常にコストの影響を受けやすいのですが、高価な製品により高精度なマーキングが求められるように、高付加価値マーキングへのニーズが近年増加しています。このような状況では、超短パルスレーザーなどのより高品位で高額なレーザー光源が使用されることがあります。

いわゆる「ブラックマーキング」は、高付加価値レーザーマーキングの代表例の一つです。これはタブレットタイプのコンピュータ製造メーカーが使用している技術で、アルマイト処理されたアルミケース製品に文字やシリアル番号を刻印するものです。

ブラックマーキングでは、ピコ秒レーザーのビーム・フォーカスをアルミの表面下に当てることで、この部分でのみ多光子吸収させます。レーザーによってアルミ内にマイクロストラクチャを生成し、そこに光を閉じ込め、その部分が黒くなり、その上に重なるアルマイト層はクリアな状態のままです。その結果、高い視認性コントラストが保たれたマーキングとなり、摩擦することなく、スムーズな感触が得られます。



図3: アルマイト処理されたアルミ表面下にコントラストの強いマーキングを入れる「ブラックマーキング」

ブラックマーキングには、これまでの汎用レーザーマーキング技術に比べて高いコストに見合った重要なメリットが2つあります。1つは、偽造・模造や改造が極めて困難なマーキングが作成される点です。2つめは、この種のマーキングが見た目にも触感的にも他にはない心地よさを持っており、製品の高品質ブランドイメージと優れたスタイルの維持に寄与します。

金属、タングステンカーバイド、ダイヤモンドへのマイクロストラクチャリング

自動車産業では、マイクロストラクチャリングを行うのに超短パルスレーザーの導入が近年増えています。ある技術では、部品の表面に小さなくぼみの配列を作るのにレーザーを使用しています。これらのポケットは表面張力

を利用して油成分を保持することで金属同士の直接の接触を防いでいます。結果的に、この処理によって従来の研磨表面に比べて可動部分の大きな摩擦低減が可能です。

平坦な表面がなく、複雑な形状を持つ部品にこの様なマイクロストラクチャリングを形成するには、超短パルスレーザーは最も有効です。このタイプの表面は、エキシマーレーザーを用いたマスク投影法での加工は困難ですが、超短パルスレーザーにおいては、出力ビームを1点に集光させ、部品とレーザーの動きを組み合わせることによって複雑な形状の表面も高速に処理することができます。超短パルスレーザーのもう1つの長所は、広範囲な材料、特に超鋼やチタンの各種合金のような様々な硬い金属類に対応可能である点です。

このタイプのマイクロストラクチャリングの代表的な例はターボチャージャータービンのホイールシャフトです。これらの部品は高速回転するため、比較的大きな力がかかり、摩擦軽減させることは効率改善だけでなく、部品寿命も延ばします。レーザーは、シャフト上にくぼみの配列を生成するのに使われ、各々の幅は約10~20 μm、長さ40~100 μm、奥行き約5 μmで、これらのくぼみ合計は、ベアリング表面の総面積のわずかに数パーセントを占めるに過ぎません。

今までは、このような加工の一部は放電加工技術(EDM)によって製造されていました。EDMの主な問題点は、加工スピードが遅いことです。加えて、ツールの電極を定期的に交換する必要があり、その結果、装置のダウンタイムが生じます。さらにツールは時間経過とともに摩擦し続けるため、加工結果を常に一定に保てません。これらの要因により、時間と共に装置の維持費(CoO)が増えます。

このタイプのマイクロストラクチャリングには、以前は、ナノ秒パルスレーザーも使われていました。その場合の主な問題点は、パルス幅が長いので、レーザー照射部分の材料の周りに少なくとも変質(溶融⇒再凝固)が生じることです。穴の周囲のこれらの変質結果である「バリ」は、後工程作業として砥石で研いでそれらを除去しない限り摩

擦を生じます。しかし、この後工程は、追加コストとなり、部品の形状が不規則な場合は、その作業は困難なものとなります。

高出力の超短パルスレーザーは高速加工を可能にし、コスト削減につながるというのは、筋が通っているように見えますが、実際、自動車産業用途では、その逆のケースがあります。これは多くの自動車製造業におけるタクトタイムが材料の移送処理や位置設定等々、レーザー以外の処理によって制限されるためです。したがって高出力のレーザーを使用している、時間のほとんどがアイドリング状態(待機状態)であることが多く、フルに活用されているとは言えない状態で、高出力レーザーを使用している、その価値を無駄にしています。

マイクロストラクチャリングのもう 1 つの重要な用途は、加工ツール産業における切断刃の加工です。超短パルスレーザー加工は特に、タングステンカーバイドやダイヤモンドなどの硬い材料に有効です。レーザーで行われる非接触の非熱加工は、材料を除去することで高品質でチップ(欠け)の無い切断刃を作ります。大きい細粒度の材料の場合は、レーザーでダイヤモンドの粒子の一部を除去し、滑らかさを最大限にすることもできます。この品質レベルは、従来の機械的な加工方式では事実上、実現不可能です。



タングステンカーバイドに埋め込まれた 2 μ m - 40 μ m の細粒を持つ多結晶ダイヤモンド(ILJIN CXL-II)で構成される切削ツールの切削品質の比較

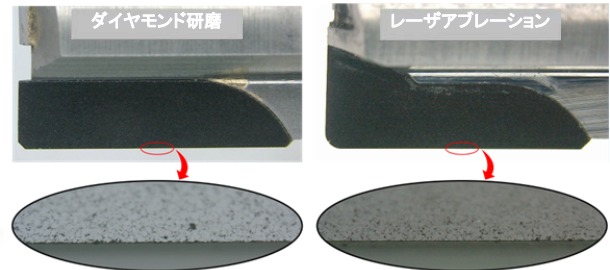


図 4: EWAG Laser Line Ultra (上):ダイヤモンドツール製造システム。写真(下)は、従来のダイヤモンド研磨によるものとレーザーアブレーションによるツールのエッジを比較。レーザー手法の方が、より滑らかな仕上がりがり、チップ(欠け)も事実上発生していません。

さらに、レーザー加工では、ツール刃を等高線状に正確な形に形成することが可能で、また凹形状にすることもできます。その結果、ツールの機能向上だけでなく、ツールの製品寿命も延ばせます。これは良く知られていることですが、ツール刃を鋭角的にするより、やや丸めにした方が寿命が長く、刃こぼれしにくいのです。

薄膜アブレーション

多くのマイクロエレクトロニックデバイス、フラットパネルディスプレイ、太陽電池の製造において、誘電体、金属や半導体材料の薄膜を交互に層としてパターン化していく必要があります。例えば、タッチスクリーンでは、約 100 μ m 精度の線幅で透明な高導電性の酸化膜全体にスクライブする必要があります。以前は、このようなパターン加工はある種のフォトリソグラフィーの手法で行わ

れてきました。しかし、これは複雑でいくつもの工程から成るプロセスを必要とし、大規模な資本投資、高い組み立て費用、重要な環境対策、そして長期の組み立てが必要です。その結果、レーザーによるパターン加工のほう大幅に個々の工程数が削減でき、また通常、溶液を使用する化学処理が不要である為、より広く使用されるようになってきています。

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「スパレーション (spallation)」と新しいプロセス概念が最新の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。この新たな製造プロセスによって薄膜(数百ナノメートル以下)を必要な空間的分解能にて下部層に損傷を与えずに、選択的に除去することができます。しかも、スパ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。

スパレーション(spallation)は、波長吸収率が大幅に異なった2層間のわずかな部分をレーザーで気化させることです。1層目(外側層)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。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ます。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。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。そして、これも重要なことですが、このレーザーによるスパレーション・プロセスでは、周囲および下層の材料への損傷が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。

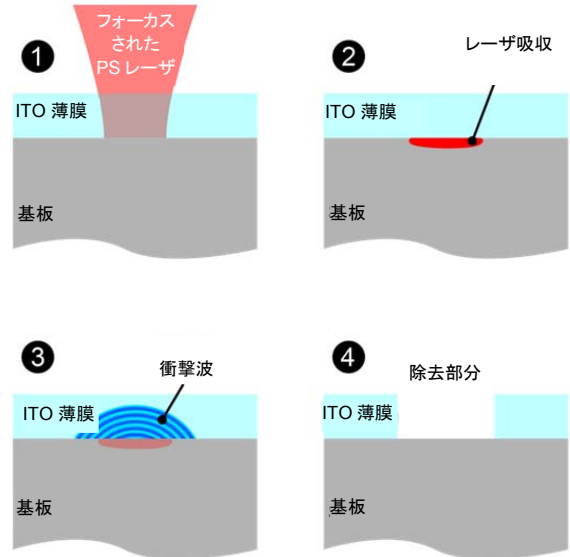


図5: スパレーションにおいて、
①集光されたレーザー光が1層目を透過、②2層目の表層が熱せられ、
③2層間で衝撃波が増長し、④薄い層が吹き飛ばされます。

太陽電池の製造におけるスパレーションの使用一例があります。SiO₂ パッシベーション層を加えることで、光を電力に変換する効率を向上させることが知られています。この層は電気的導通のため、選択的に除去する必要があります。次の走査型電子顕微鏡(SEM)写真は、単発の355 nm超短パルスレーザーのパルスを使用してシリコン基板から除去されたSiO₂薄膜の例を示したものです。シリコンの溶融や基板の損傷は認められておらず、したがって、クリーニング等の後処理も不要です。

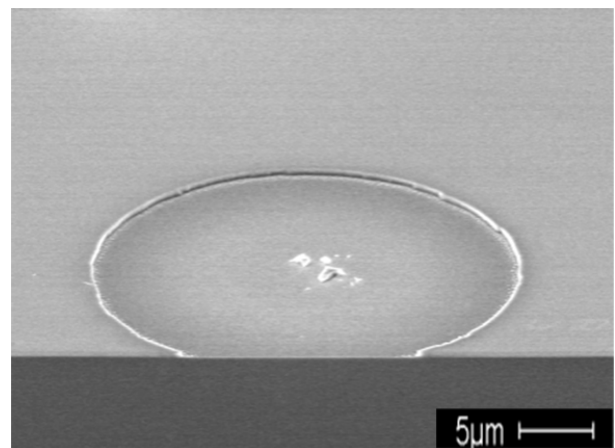


図6: 355 nm のピコ秒パルスレーザーの最適条件を使用して、シリコンから SiO₂ を除去 (~0.11 J/cm²)

結論

結論として、産業用超短パルスレーザーは、金属、ダイヤモンド、薄膜、その他加工が困難な材料に様々な高精度加工をする上で大きなメリットを提供することができます。出力特性、信頼性、そして、レーザーの維持費などの改良が日々行われているため、品質が重要な課題となる用途面で増大するニッチ・マーケットに、これからさらに導入されるでしょう。

執筆者

Dr. Dirk Mueller、理学博士、製品ライン管理ディレクタ、
Coherent Inc.