

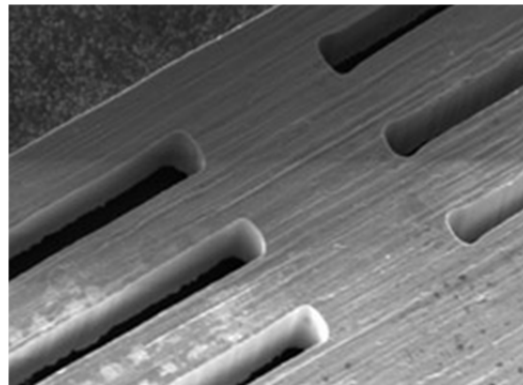
## 高品位産業用マイクロマシニングに向けたピコ秒レーザ

コヒレント社 ルメラレーザテクノロジー、プロダクトラインマネージメント担当取締役  
ダーク・ミュラー

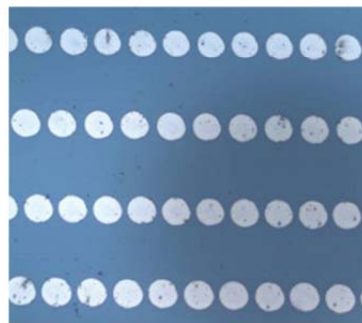
CW や疑似 CW レーザがマテリアルプロセス市場に変革をもたらしたように、ピコ秒レーザが今、マイクロマシニングの世界を大きく変えようとしています。30 年以上前、ミリ秒/ナノ秒のパルスレーザが、新しい加工能力を提供することを証明し始めた頃、マイクロマシニングにおけるピコ秒レーザの到来はすでに告げられていました。今日では、ミリ秒/ナノ秒のレーザパルスは、ウェハへの孔明け、薄い金属シートの切断、セラミックのスクライブ、自動車部品、クレジットカードやパスポートへの印字などに利用されています。マイクロマシニングにおいてレーザは、柔軟性、信頼性、生産性、自動化が容易である、機械的な圧力を掛けない、また対象物への汚染がない等の点で、機械的なツールより優れています。

ピコ秒レーザが紹介されるまでは、すべての応用において、特定の材料における非常に速い局所的な熱、溶解、蒸発の原理、のちにバリや再結晶化やマイクロクラックのような製品上の熱的副作用を引き起こしていました。近年、産業用のウルトラファーストレーザが市場に多く登場し、大きな熱影響を与えることなく、新たな加工品質レベルを実現するピコ秒のパルスに注目が集まっています。特に、ピコ秒の短いパルスでは、吸収プロセスに依存しない微細加工が可能となり、特定の材料によらない、広範囲な加工が実現します。基本的にレーザマイクロマシニングでは、材料に照射した際にプラズマを形成します。ピコ秒パルスの大きな電界フィールドは、質量の低い電子を原子からはぎとります。正に帯電した原子は、クーロン爆発を受けて取り残されます。さらに短いフェムト秒領域のパルスであれば、品質をより向上させることができるかもしれませんが、フェムト秒レーザはより複雑で、壊れやすく、出力当たりのコストが高くなってしまいます。ピコ秒レーザで生じる電界領域は、このプロセスを引き起こすために充分です。

また、より短パルス化するという事は、システムを複雑にするだけです。フェムト秒の高いピークパワーは、注意してビーム伝搬を行う必要性が求め



20  $\mu\text{m}$  のシルバーに 15  $\mu\text{m}$  幅のスロット例



70 nm の SiN 層の除去例

ドットの径は 50  $\mu\text{m}$ 、毎秒 100 万ドットの加工スピード

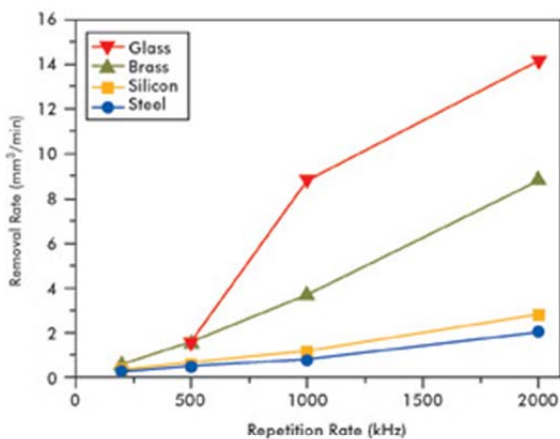
られ、期待されない非線形効果を引き起こし易いと言えます。

その点で、ピコ秒パルスは品質とコストを両立しています。ピコ秒パルスは優れたビーム品質を備えており、また適切なエネルギーレベルとなっており、信頼性の高い生産用ツールとして利用することが可能です。平均出力 50W 以上で、メガヘルツの繰返しレートに到達しており、経済的で産業レベルのスループットを実現します。エネルギー強度が、アブレーションの閾値 ( $\sim 1\text{J}/\text{cm}^2$ ) をわずかに超えると、ほとんどの材料は 10~100 nm の厚さの材料層を除去することができます。アブレーションの閾値は、材料の種類 (0.1~2J/cm<sup>2</sup> の範囲) によって様々ですが、波長やパルス幅や他のコンディションとは無関係です。

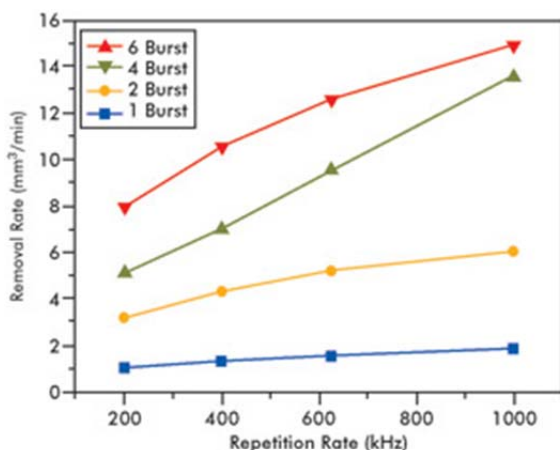
ほとんどのマイクロマシニング応用では、表面構造に彫刻を施すことに興味を持たれています。即ち、スクライブ溝を入れたり、外周形状をカットした

り、孔を開けたり、特定の層を剥離したり、特定のパターン領域を除去したりするための‘非熱’マイクロ除去といったものです。50  $\mu\text{m}$  以下の構造を作る際には、機械ドリルやフライス盤や放電加工機では、プロセスの信頼性やコストで無理を強いられます。M<sup>2</sup> < 1.5 であるような高いビーム品質のレーザーは簡単に 5~50  $\mu\text{m}$  のスポットに集光でき、同等のサイズに加工することができます。典型的な集光スポット 25  $\mu\text{m}$  径では約 10  $\mu\text{J}$  のエネルギーを与えれば、約 1J/cm<sup>2</sup> のアブレーション閾値を満たします。

より高いエネルギー密度が、必ずしもより良く、ないしは早く仕事を行うことには結びつきません。アブレートされたプラズマがより密になり、加工表面から取り除けなくなってしまう。悪い条件下では、材料の中で熱成分に変わってしまい、非熱加工とは呼べない品質になることもあります。‘非熱’微細加工の理想的な産業用ピコ秒レーザー発振器は、1 MHz の繰返周波数で 10~50  $\mu\text{J}$  のレンジになるパルスエネルギーを発生するものとなります。高い繰返し周波数によっても、先のパルスのプラズマクラウドが覆ってしまうため、結局加工効率を下げてしまいます。



繰返しの向上による除去レートの向上



バーストモード動作による除去レートの飛躍的な向上

最近では、数ナノ秒周期のパルス分離(バーストモード)が、アブレーションレートを実質的に改善するばかりでなく、加工品質を向上することが発見されています。例えば、ブラインドホール表面粗さなどです。バーストモード動作における 50W のピコ秒レーザーでの実験では、±60 mm<sup>3</sup>/分の除去レートを実現しています。低いアスペクト比(深さ/径)の応用では、ガラスにおいて 20~60 mm<sup>3</sup>/分、ステンレス鋼において 10 mm<sup>3</sup>/分、シリコンにおいて 30 mm<sup>3</sup>/分、有機材やバイオ材において 10 mm<sup>3</sup>/分の生産効率となります。

光子あたりのコストも、過去 4 年間で 10 倍下がっています。ピコ秒レーザーは、非常に経済的な選択肢になったため、生産品あたりのコスト試算では、多くの他の加工手法と張り合うまでになっています。適切な出力とビームモードが得られるピコ秒レーザーの初期投資は、同条件のナノ秒のレーザーに比べると高いが、総コストオーナーシップはわずか \$0.29/分です。立方晶窒化ホウ素 (CBN)、ダイヤモンド、サファイア、ガラス、セラミックのような硬く、加工の難しい材用に対しても、20 mm<sup>3</sup> ないしそれ以上で加工ができます。そのため絶えず成長している数々の応用を実現します。たとえば、薄型化や小型化がその製品価値を引き上げる半導体業界 (Low-k 材料) や、太陽電池産業 (特に薄膜技術)、ディスプレイ技術 (透明導電酸化膜、有機 LED など)、オンデマンドマイクロモールド、精密なアパーチャと電極構造、印刷業界のための大きなマイクロ構造の表面加工、ロールのエンボシングまたは医療インプラントなどです。大きな海洋船なども微細加工の候補となります。ミクロンサイズの形状は、汚染防止や摩擦の低減を実現します。大量生産として重要な薄いガラス材の切断や孔あけと同様に、高圧縮シリンダのインジェクターノズルなどがあります。そして大規模の産業応用を満たすため、ピコ秒レーザーには、1 年以上の MTTF と 1 時間以内の修理時間が求められています。新しい世代の産業用ピコ秒レーザーはすでにそのようなパフォーマンスを実現しています。

アナリストによると、今後産業用ピコ秒レーザーのマーケットは、3~4 年以内に 10 倍になるとみられています。出力レベルは 500W に到達し、コストが下がり、スループットは上がります。信頼性と所有コストが今後大規模な工業用途において、最も大きな測定基準になるでしょう。