

## フェムト秒パルスとPSOテクノロジー（位置同期出力技術）のコンビネーションが優れた品質と高スループットを実現

超短パルス（USP）レーザー、特にフェムト秒レベルのものは、熱影響とデブリ形成を最小限に抑えつつ、クリーンに材料をアブレーションできるため、眼科手術、医療機器や医療用インプラント、先端マイクロエレクトロニクス、フラットパネルディスプレイなどの分野における、幅広い種類の精密加工用途における理想的な光源です。アプリケーションに関係なく、同等の優れた品質を維持しながらスループットを上げるために、より高い出力、短い波長、新しい技術が強く求められています。この要望に応えるためにMKS Spectra-Physics®は、「IceFyre® FS UV50」を発表しました。このレーザーは1.25MHzの繰返し周波数において、紫外（UV）波長で50Wのフェムト秒パルス出力を実現します。

出力レベルとパルス周波数がこれだけ高くなると、フェムト秒パルスの特長である小さな熱影響部（HAZ）を維持しつつ高いスループットを達成することは困難です。これを達成するには、与えられた軌道に対するビーム走査速度をできるだけ高くしながら、レーザーパルスが加工対象物上に均等間隔で照射されるようにして、処理の均一性を確保する必要があります。ガルバノスキャナーシステムは加速度が非常に高く、より長い直線的な区間を毎秒数十メートルもの速度で走査できるため、一般的に使用されています。しかし、形状にカーブや方向転換がある場合は、走査速度は格段に低くなります。

安定した加工品質で最大限のスループットを得るには、レーザー光源は、パルスエネルギーとビームパラメータを一定に保ちながら、軌道速度の変化に比例して変化する制御された周波数でパルスを出力する必要があります。時間軸上の任意の時点でトリガーされる、安定した一貫性のあるパルスを照射する機能は、パルスオンデマンド（POD）と広く呼ばれています。レーザーのパルス周波数を制御することによって、加工対象物（あ

るいはビーム）が動く場合に所望の位置にパルスを照射しようとする手法などに対して、この機能が必要になります。この手法は、位置同期出力（PSO）として一般的に知られています。PSOには、軌道速度に比例する周波数で電気トリガーパルスを生成するモーション制御システムと、そのような信号に対応して安定した光パルスを「オンデマンド」式に供給するレーザー光源の両方が必要です。図1は、速度を落として通過する丸みを帯びたコーナー（角）と、速度を上げて通過する直線部で構成される軌道に対する、PSOの概念を图示したものです。

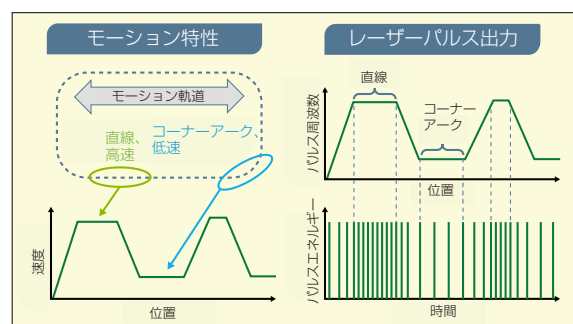


図1. PSO制御により、丸みを帯びたコーナーを持つ長方形など、可変速度の軌道全体にわたって、一定エネルギーで一定間隔のレーザーパルスが得られる。

PSOは、多軸リニアステージのモーションと高速ガルバノスキャナーシステムの両方に対して、スループット上のメリットがあります。リニアステージの場合、PSOは、丸みを帯びたコーナーの低い速度に軌道全体の速度を合わせる必要がないというメリットがあります。ガルバノスキャナーでの加工の場合は、レーザーパルスをトリガーする前にミラーを最大速度まで加速する必要がないことにメリットがあります。

モーションコントロールの面では、PSO機能はリアステージシステムに対しては比較的成熟しており、ガルバノスキャナーに対してはより最近になって適用されるようになった状態にあります。しかし、最先端のPSO対応のレーザー技術は、より短い波長で動作するフェムト秒レーザーに対しては特に、十分に洗練されていません。従来の超短パルスレーザーのMOPA (master oscillator, power amplifier) アーキテクチャは、PSO動作のためのパルス出力の同期に対して課題を示します。これは、従来からの超短パルスレーザーに用いられているMOPA構造は、フリーランニング発振のオシレータパルスを任意に取り出して増幅する方式であり、PSO動作における同期速度に関しては、増幅段階におけるパルス取り出し速度に依存する性質によるものです。この固定周波数の発振器に起因して、必然的にタイミングジッターが生じます。タイミングジッターとは、パルスが要求（トリガー）される時点と照射される時点の間の時間遅延のばらつきのことです。これは、加工対象物上のパルスの空間位置誤差（空間ジッター）につながります。軌道に沿った所望の位置に最も合致するように、選択したパルスをデフォルト位置から隣接パルスの方向にシフトするなどの高度な手法を適用しても、満足のいく結果が得られない可能性があります。従来のUSPレーザーアーキテクチャは基本的に、限られた位置精度で安定したパルスエネルギーを維持するか、パルスエネルギーの安定性を落としてパルス配置を改善するかのいずれかで、高い位置精度と高いパルスエネルギー安定性の両方を両立させることは困難です。しかし、レーザー技術の進歩により、この問題はほぼ克服されました。異なる設計アーキテクチャによって現在、パルス間のエネルギー安定性とビーム品質を維持しながら、任意の周波数でのパルス生成、増幅、高調波（波長）変換が可能となっています。これは、POD機能を実現するものです。

IceFyre FS UV50はPODに対応し、一定のエネルギーとビームパラメータを持つパルスを「オンデマンド」で出力します。MKSのアプリケーションエンジニアはPSO機能のメリットを実証するために、このレーザーをPSO動作向けに設定された高速2軸ガルバノスキャナーシステムと組み合わせて使用して、一連の実験を行いました。

図2は、1×1mmの正方形の1つのコーナーを、(a)従来のフリーランニング方式（パルス周波数が一定）、(b)スカイライティング方式、(c)PSO方式を用いて、それぞれ1m/s、5m/s、10m/s、15m/sの走査速度で加工した顕微鏡画像です。

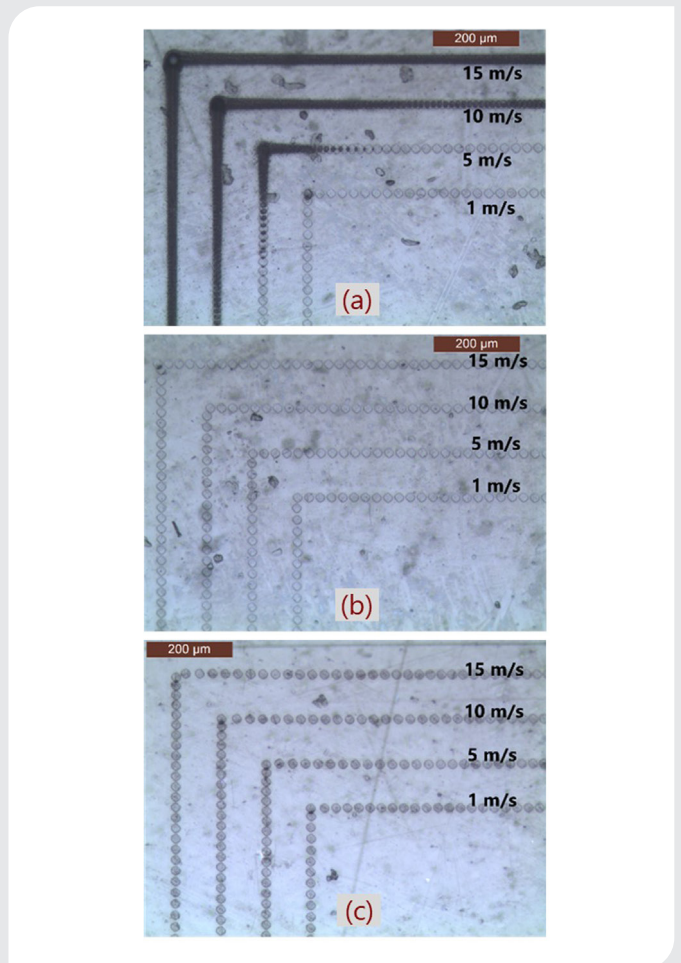


図2. 1×1mmの正方形の1つのコーナーを、(a)フリーランニング方式、(b)スカイライティング方式、(c)PSO方式を適用して、UV超短パルスレーザーで加工した顕微鏡画像。

従来方式とスカイライティング方式では、25  $\mu$ mの一貫したパルス間隔が維持されるように、各速度に対するレーザーのPRF（パルス繰返し周波数）を調整しました。PSO方式については、25  $\mu$ mのパルス間隔と一貫したパルスエネルギーが、実際の速度にかかわらず軌道全体を通して材料上で維持されるように、制御ソフトウェアをプログラムしました。

その結果の概要は以下のとおりです。

- 図2(a)はフリーランニング方式の結果で、スキャナーミラーの加速と減速が行われるコーナー部で、パルススポットの間隔がより詰まった状態になっています。したがって、この方式で加工すると、スポット間隔は不均等になり、その結果、熱影響が生じて加工品質は低下します。多くのアプリケーションにおいて、このコーナー部の加工品質はととても許容できるものではなく、しかもその加工は、レーザーとスキャナーの能力を大きく下回る、約1m/sという低い走査速度で行う必要があります。
- 図2(b)はスカイライティング方式の結果で、品質の観点からは許容できるものです。しかし、スカイライティング方式では目標速度に達するまで、レーザーをゲートオフした状態のリードイン及びリードアウトモーションのセグメントが、軌道セグメントの前後に追加されます。これによって、加工軌道の完了に追加的な時間が必要となり、スループットは低下しますが、スポット間隔は均一になるため、全体的な品質目標は達成されます。
- 最後の図2(c)では、PSOの実装によって、スポット間隔と一定のパルスエネルギーがすべての速度において維持され、卓越した品質と最大限のスループットが得られます。

金属の高品質エングレービングは、USPLレーザーのアプリケーションとしてよく知られています。しかし、今日の高出力レーザー光源によって最大限の品質とスループットを得たいのであれば、PSO機能が必要です。これを実証するために、上記の3つの加工方式（フリーランニング、スカイライティング、PSO）を使用して、7.5m/sで動作するガルバノスキャナーによって、ステンレス鋼に1×1mm<sup>2</sup>の正方形をエングレービング（彫刻）しました。パラメータは、スポット間とクロスハッチラインの重なりがどちらも50%になるように調整しました。3D共焦点顕微鏡を用いて、レーザー加工された形状の解析を行い、その結果を図3に示します。

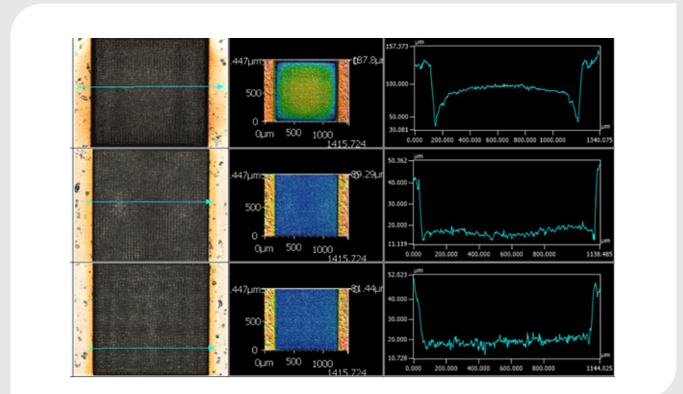


図3. フリーランニング方式(上)、スカイライティング方式(中央)、PSO方式(下)を適用した、ステンレス鋼のエングレービングの3D共焦点顕微鏡画像と分析結果。

従来のフリーランニング方式では、スキャナーモーションの加速フェーズと減速フェーズの繰り返しによって、同じ箇所を何度も重複して通るために、パターンのエッジ部分は過度にエングレービングされます。スカイライティングと速度依存のトリガーを用いる手法でも、結果は似たような品質になります。一方、PSOによる加工速度は、スカイライティングよりもはるかに高く(>40%)、この手法の明らかなメリットを実証しています。

レーザー出力を上げれば、当然ながら加工のスループットは上がりますが、その処理に対応する補助装置が必要になります。高速ガルバノスキャナーと高精度モーションステージにより、加工対象物の処理に使われる軌道に対して、レーザーパルスの高精度な時空間同期を行うための機能が整います。IceFyre FS UV50レーザーのUV波長とフェムト秒パルス幅が可能にする優れた加工品質は、高度なPSOパルス制御技術と組み合わせることで、最大のスループットが達成可能になります。

## 製品

### 製品: IceFyre FSUV50/IR200レーザー

IceFyre FSは、市場で最高のパフォーマンスを発揮するUVフェムト秒レーザーであり、50Wを超えるUV出力、50μJを超えるパルスエネルギー、200WのIR出力、高パルスエネルギー(>200μJ)を提供し、シングルショットからIRの50MHzまでの幅広い繰返し周波数を提供します。

高い平均出力(>200W)と高いパルスエネルギー(>200μJ)を最大50MHzの高繰返し率と組み合わせることで、フェムト秒微細加工アプリケーションは最小の維持コストで最高レベルのスループットを実現します。IceFyre FSプラットフォームは、調整可能な繰返し周波数、パルスオンデマンド(POD)および位置同期出力(PSO)トリガリ

ング、および柔軟なバーストモード操作のためのTimeShiftプログラム可能なパルス機能により、最適なプロセスパフォーマンスのための卓越した汎用性を提供します。MKSの深い経験と技術に基づいて構築された特許出願中のIceFyre FSレーザーは、厳しい環境認定テストをクリアし、高い信頼性と低い維持コストを実現します。完全に自動化され、コンピューター制御されたレーザーは、24/7運転においても出力、ビームパラメーター、およびビームポインティングにおいて並外れた安定性を示し、要求の厳しいアプリケーションに高精度と再現性を提供します。

	IceFyre FS UV50	IceFyre FS IR200
波長	343 ±2 nm	1030 ±6 nm
最適化パルス周波数での出力	>50 W @ 1 MHz and 1.25 MHz	>200 W @ 1-50 MHz
最大パルスエネルギー	>50 μJ @ 1 MHz	>200 μJ @ 1 MHz
繰返し周波数	シングルショット - 3 MHz	シングルショット - 50 MHz
パルス幅, FWHM	<500 fs	
パルスエネルギー安定性	<2% rms	
出力安定性 (ウォームアップ後)	<1% rms、8時間以上	
空間モード	TEM <sub>00</sub> (M <sup>2</sup> <1.3)	
偏光	>100:1 (垂直)	
ビーム径 (出射口にて)	5.0 mm ±0.5 mm	
ビーム拡がり角 (全角)	<0.20 mrad	<1.0 mrad