

プログラム可能なUVナノ秒パルスによる銅の微細加工能力の向上

医療用デバイスから先端マイクロエレクトロニクスにいたるあらゆる分野において、さらに小型で高精度な製品に対する需要が高まる中、レーザーは以前にも増してなくてはならない製造ツールとなっています。非常に要件が厳しい微細加工処理に対しては、ピコ秒やフェムト秒レベルのパルス幅を持つ、超短パルス(USP)レーザーが採用されるケースが増えています。これらのレーザーは、最高レベルの精度と品質の加工を達成することができるためです。

しかし、USPレーザーは万能なソリューションではありません。特に、全般的なコストを抑えつつ高いスループットを達成するという点では、いくつかの実用的な限界があります。一方、ナノ秒(ns)パルスレーザーは、より成熟した技術であり、一般的にアブレーションレートは高く、低コストで、信頼性は高く、実装は容易です。主に熱アブレーションによって材料を除去するため、最高精度の加工には限界がありますが、紫外線(UV)またはそれよりも短い波長と、10ns未満の短いパルス幅を使用することで、その制約を緩和することができます。

MKSのSpectra-Physics®は、ナノ秒パルスレーザー「Talon® Ace™ UV100」を開発しました。この製品は100WのUV出力を高いスループットで提供し、最小で2nsのパルス幅を高いパルス繰り返し周波数(PRF)で生成することにより、高速で高精度な微細加工に対応します。Talon Aceの主な特長の1つは、その革新的なTimeShift™プログラマブルパルス機能で、2~50nsのパルス幅を生成し、整形されたパルスやパルスバーストのような出力調整を行うことができます。これにより、従来のQスイッチナノ秒パルスレーザーでは不可能だったアプリケーションに対応できる性能レベルが実現されています。

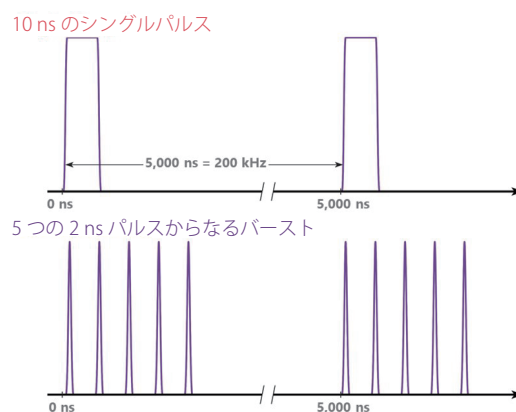


図 1. バーストモードでは、単一のパルスの代わりに、一連の短いパルス(サブパルスのバースト)がレーザーから照射されます。バーストを構成する各パルスの合計エネルギーは、同じ繰り返し周波数の(それよりも長い)シングルパルスとほぼ同じです。

図1は、Talon AceのTimeShiftバースト出力機能を図示したもので、5つの2nsパルスからなるバースト(5×2nsバースト)が、単一の10nsパルスと比較して示されています。どちらも出力パルス(またバースト)のPRFは200kHzです。どちらの場合も、「レーザーオン」時間の合計は約10nsです。しかし、バースト出力では、エネルギーが一連のサブパルスに分散されており、個々のサブパルスは、効率的に材料をアブレーションするためにより適している可能性があります。サブパルスの間の間隔時間と、サブパルスに含まれるエネルギーは、レーザーの動作PRFとは関係なく、どちらも完全にプログラム可能です。また、さまざまなTimeShift出力プロファイルの間の切り替えに要する時間は、数十マイクロ秒程度と非常に高速で、複数種類の材料からなるサンプルを加工する際のオンザフライの変更に適しています。

TimeShiftのほぼすべてのパラメーターが変更可能で、ユーザーは、アプリケーションの特定のニーズに合わせてパルス出力をカスタマイズすることができます。このような高い適応性では、どのように使用すれば、微細加工プロセスにおけるスループット、効率、品質を高められるかを調べておくことが重要です。

Talon Aceの銅板材料（6mm）に対する微細加工能力を特性評価するために、実験を行いました。シングルパルス出力とバーストパルス出力を使用し、従来のLD励起Qスイッチ固体レーザー（Spectra-Physics Talon UV15）の結果と比較しました。2軸ガルバノスキャナーを使用して、マルチパスのラスタースキャン処理によって、材料を切削してポケットを作成しました。空間的なパルスのオーバーラップは、XとY（スキャン方向とステップ方向）の両方向で60%、PRFは、全体を通して50kHzとしました。 $f=163\text{mm}$ のテレセントリック対物レンズでビームを集光し、外部の可変パワーアッテネータを使用して、入射フルーエンスを制御しました。

アブレーションレートと効率を、加工部の深さの測定値（と体積の計算値）と、レーザー照射の特性全般（出力、パルス数、加工時間）から算出しました。図2は、時間的に異なる3種類のパルス出力について、体積測定に基づくアブレーション効率とピークフルーエンスの関係を示したものです。アブレーション効率は、単位時間あたりの除去材料体積を、平均出力1Wで正規化した値で、単位は $\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$ です。

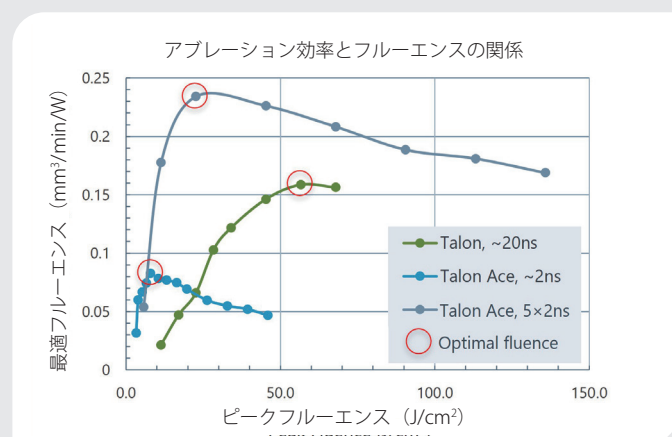


図2. アブレーション効率データ。パルス幅の重要性と、銅加工に対してパルスバーストを使用するメリットを示しています。

フルーエンスが低い場合は、2nsのシングルパルスで動作するTalon Aceの方が、20nsの従来のQスイッチレーザーよりもアブレーション効率が高くなりました。興味深いことに、2nsパルスによる効率が最大になるフルーエンスレベル（約 $8\text{J}/\text{cm}^2$ ）は、20nsパルスの閾値（実質的に材料がまったく除去されないレベル）にほぼ相当します。フルーエンスが高くなるとこの状況が逆転し、20nsパルスのアブレーション効率は、2nsパルスの2倍近くにまで達します。

熱拡散に基づいて、この結果を説明することができます。パルス幅が長いほど、熱が銅材料に拡散する時間が長く、それによって材料に吸収されるレーザーエネルギーが希釈されます。そのため、アブレーションを引き起こすためにより高い入射フルーエンスが必要になります。しかし、ひとたびアブレーションが始まれば、パルス幅が長いほど、除去される体積は大きくなります。一方、より高いピーク出力でより短いパルスを照射する場合は、熱が大きく拡散される前に材料のアブレーションが引き起こされます。明らかに、パルス幅が短い方が、適切に制御されたアブレーションを低い熱的負荷で行うことができます。また、低いフルーエンスで最大効率を得られるため、材料に印加されるエネルギーが低くなり、熱影響部（HAZ）は小さくなるはずです。

バーストモード出力（ここでは、5つの2nsサブパルスからなるバースト）では、アブレーション効率は格段に高くなります。それぞれのピーク値で比較すると、Talon Aceのバーストモードの効率（ $0.23\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$ ）は、2nsのシングルパルス（ $0.08\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$ ）の2.8倍で、Talon Qスイッチレーザーの20nsパルス（ $0.16\text{mm}^3/\text{min}/\text{W}$ ）よりも50%近く高くなりました。バーストモードの方がアブレーション効率が高いというこの結果は、USPレーザーを使用した同様の実験結果（アプリケーションノート41）と一致していますが、その理由については完全には解明されていません。

従来の光学顕微鏡と3D走査型白色光干渉計を使用して、品質分析を行いました。図3は、先ほどの3種類のパルス出力によって加工した銅面の拡大図です。それぞれの最適なフルーエンス条件（図2のグラフのピーク箇所）、またはそれに近い条件で、実験を行いました。

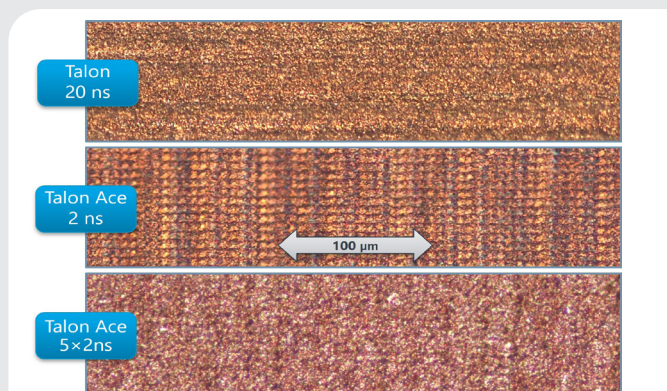


図 3. 2nsと20nsのシングルパルス出力と5×2nsのバースト出力による加工面品質を示す光学顕微鏡写真の拡大図。

図3の写真は、すべての条件で概して良好な品質が得られることを示しています。しかし、Talon Aceのシングルパルス(2ns)出力による加工面では、個々のアブレーションドット(クレーター)が顕著であり、これは熱影響(溶融など)が最小であることを示しています。熱影響がそれよりも大きければ、ドットは混ざり合っていたはずで、対比的に、Talon Qスイッチレーザーと、Talon Aceのバーストモードでは、個々のアブレーションドットがより明確に混ざり合っており、やや粗いものの全体的により均一に見える表面が得られています。これは、レーザーと材料の相互作用における何らかの熱特性によるものと考えられます。例えば、局所的な溶融は、その場(in-situ)で表面形状を均一化するように作用します。

次に、加工部のエッジのバリ形成を、走査型白色光干渉計で検査しました(図4)。

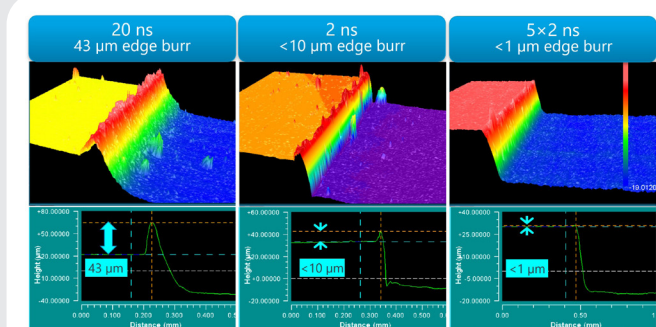


図 4. 光学表面形状測定では、パルス幅を20nsから2 nsにするとエッジのバリが抑えられ、5×2nsのバースト出力を使用するとバリはさらに減少することがわかります。

エッジのバリに関しては、Talon Aceのバーストモードが、他の2つよりもはるかに良い結果となりました(エッジのバリは平均で1μm未満)。この例ではどのプロセスも、エッジのバリを抑えるように最適化されていないため、すべてのケースでおそらく改善が可能であることに留意する必要があります。しかし、最適化を行ったとしても、エッジのバリが最も抑えられるのはやはり、Talon Aceのバーストモードになると予想されます。

Talon AceのTimeShift機能を銅の加工に適用することのメリットは、12/25/12μmの銅/ポリイミド/銅の積層材料に対するビアホール加工という、難しい産業用途で実証されています(アプリケーションノート69)。このアプリケーションノートでは、複数の工程からなるプロセスの重要な最初の工程で、トレパニングではなく簡素化されたパーカッション加工によって、上部銅層に50μmの開口部を開けました。パーカッション加工は、本質的により高速で、(可動部品がないなどの理由により)低コストですが、大きな穴径と高い品質の両方を達成するのは困難です。図5に、10×2nsのバースト出力による結果を、2種類のシングルパルス出力(10nsと2ns)による結果と比較した、画像とデータを示します。

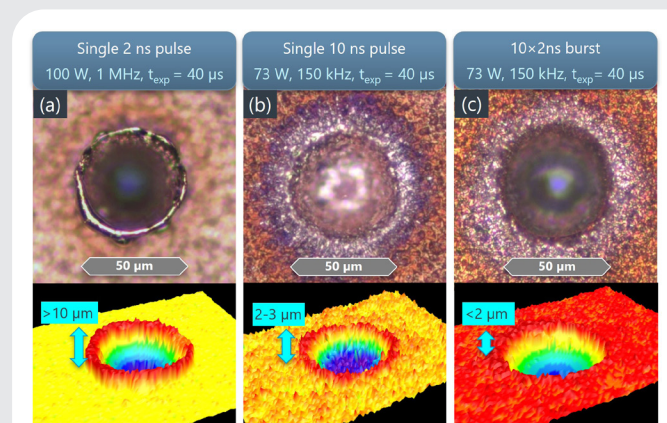


図 5. 平均出力が同じか低い場合は、10×2nsのバースト出力の方が、10nsと2nsのシングルパルスよりも、Flex PCBの上部銅層のビアホール加工では優れた結果が得られます。

わずか40μsという短い穴あけ時間では、パルス幅が10nsと2nsのシングルパルスでは、許容できるレベルの品質とスループットを達成することはできませんでした。

しかし、10×2nsのバースト出力では、明らかに優れた品質を持つクリーンなスルーホール（貫通穴）が、同じ時間で形成されます。バリの高さが低いこと（2μm未満）は、銅メッキや、複数のFlex PCBラミネートの積層などの下流工程において重要です。

パルス幅について語るとき、しばしばレーザーは、ナノ秒かUSPかで分類されることが多いですが、本稿に示した結果は、より微細な区別が存在することを示唆しています。10ns未満のより短いパルスと、数十ns

のパルスとでは、加工結果が大きく異なる可能性があります。また、USPレーザーでもよく見られるように、ナノ秒パルスのバースト出力には、素晴らしい加工上のメリットがあり、それは、経済的にも大きなメリットにつながる可能性があることも明らかです。ナノ秒とUSPの両方の領域でTimeShiftパルス制御機能を提供するMKSのSpectra-Physicsレーザーは、最も困難で複雑な産業用レーザー加工アプリケーションに適していると同時に、強力な価値提案を提供します。

製品

Talon® Ace™レーザー

Talon® Ace™ UV100は、業界をリードする100Wを超えるUV出力を、小さなフォームファクタと魅力的なコストパフォーマンスで提供する、強力なパルスナノ秒レーザーです。この新しいレーザーは、TimeShiftプログラムパルス機能や、広いパルス繰返し周波数範囲といった、前例のな

い柔軟性を備え、微細加工プロセスの最適化を可能にします。Talon Ace UV100は、先端エレクトロニクスパッケージング、プリント基板、太陽電池、セラミックス、半導体、その他の材料やコンポーネントの微細加工における、高速かつ高品質の製造に最適です。

	Talon Ace UV100
波長	343nm
出力	>100W
パルスエネルギー	>500μJ
繰返し周波数	0-5.0MHz
TimeShift プログラム可能なパルス機能	Yes
パルス幅 (FWHM) (TimeShiftによるプログラム)	<2 - >50ns
ウェーブフォームスイッチングタイム	< 20μs
パルスエネルギー安定性	<3%, 1σ