

SEMICONDUCTOR DIGEST

NEWS AND INDUSTRY TRENDS

APRIL/MAY 2026

Optimizing ABF
Drilling with
Lasers p. 17

Quantum
Diamond Magnetic
Imaging p. 22

Silicone-based
Thermal Interface
Materials p. 25



先進的なX線技術:
見えないものを見る

ピコ秒レーザーによる ABF 穴あけの最適化

著者：JIM BOVATSEK (MKS Spectra-Physics シニアマネージャー)

「バースト・オン・ザ・フライ (burst-on-the-fly)」パルスを用いたピコ秒レーザーは、味の素ビルドアップフィルム (ABF) の微細ビア加工において加工速度、品質、コストを改善できる可能性があります。

現在のパッケージング技術では、ますます高密度化する集積回路(IC)を、より大きなプリント基板(PCB)に接続するために、限られた領域内で多数の電氣的接続を配線することが求められています。この高い接続密度の需要は、人工知能(AI)、ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)、および5G通信といった、急速に拡大する計算集約型アプリケーションによって牽引されています。

従来のプリント基板(PCB)は、これらの密度に対応するために必要な解像度を備えていません。このため味の素ビルドアップフィルム(ABF)などの誘電材料を基盤としたシーケンシャルビルドアップ(SBU)製造法の採用が進められてきました。

SBU材料は、より微細な配線幅および配線間隔、さらに小径ビアの形成を可能にし、その結果としてより高い接続密度を実現します。しかし、このアプローチを成功させるためには、高精度で大量のマイクロビアを加工できる能力に大きく依存します。

これらのマイクロビア形成には、すでにレーザー穴あけが業界標準となっています。もともとはCO₂レーザーが使用されていましたが、ビア径のさらなる小径化に伴い、ナノ秒パルスの紫外(UV)レーザーへと移行が進んでいます。しかし、ナノ秒UVレーザーであっても、処理スループット、加工精度、システムの複雑さといった点でトレードオフが存在します。

UVピコ秒レーザーは、ナノ秒UVレーザーの多くの制限を克服する手段を提供します。しかし、その加工品質は、使用する具体的な動作パラメータに大きく依存します。

このパラメータ空間を検討するため、MKSの産業用レーザーアプリケーションエンジニアは、UVピコ秒レーザーを用いて一連のABF穴あけ試験を実施しました。特に本研究では、さまざまな「バースト・オン・ザ・フライ(burst-on-the-fly)」パルス構成が加工結果にどのような影響を与えるかを調査しました。ここで示される結果は、プロセス速度とマイクロビア形状を最適化するための手法を示唆しています。

プロセス要件

ABFは、エポキシ樹脂中に硬質の無機(シリカなどのセラミック)フィラー粒子を分散させた複合材料です。

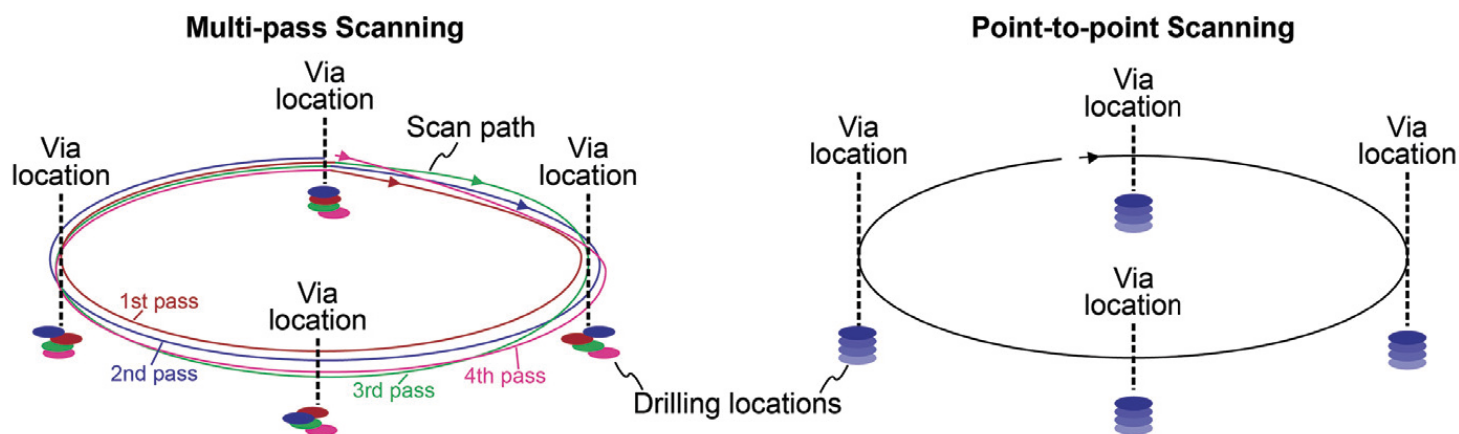


図1. マルチパススキャンでは、ビームが同じパターンを複数回なぞり、各位置に対して1回の走査ごとに1パルスを照射します。この方法は処理が高速である一方、位置ずれの影響を受けやすく、穴形状が歪む可能性があります。一方、ポイント・トゥ・ポイントスキャンでは、ビームはパターンを1回だけ走査し、各位置で停止して必要なすべてのパルスを照射します。これにより精度は向上しますが、加減速を繰り返すためスループットは制限されます。

この構造のため、有機マトリックスと内部に埋め込まれた粒子ではレーザーエネルギーの吸収特性が異なり、均一なアブレーション(除去加工)を行うことが困難になります。

現在の最先端の高密度インターコネクタ(HDI)設計では、厚さ10 μm のABF層と、直径10~15 μm のマイクロビアが使用されています。これらのビア加工における主な要件は、穴をきれいにアブレーション(除去加工)し、下層の銅層を損傷することなく完全に露出させることです。さらに、ビアは高い円形度を持ち、穴のテーパー(傾斜)は最小限でなければなりません。また、熱影響層(HAZ)や、加工時に発生するデブリ(残渣)も重要な要素です。

プロセスのスループット(処理能力)も、メーカーにとって依然として重要な検討事項です。マイクロビアは大規模なアレイ状に形成されるため、実用的な製造には、1秒あたり数千から数万個のビアを加工できる速度が求められます。

これらの制約を総合すると、プロセス条件の許容範囲は比較的狭くなり、各パラメータは相互に影響し合う場合が多くなります。例えば、スループット(処理速度)を向上させると、テーパー制御やビアの円形度が犠牲になったり、銅層を損傷するリスクが高まったりする可能性があります。

UVレーザーによる穴あけ加工

UVナノ秒レーザーは、直径約50 μm 未満のマイクロビア加工における標準技術となっています。これらはCO₂レーザーと比較して、より小さい集光スポット径と、ABF(ビルドアップフィルム)内でのより局所的なエネルギー付与を可能にします。これにより、材料の複合構造に起因する不均一なアブレーションの問題に対応できます。その結果、熱影響を抑えつつ、より高精度な材料除去が実現されます。

ABFの層を完全に貫通して穴あけするには、ナノ秒UVレーザーによる多数の個々のパルスが必要です。この事実と産業において見られる幅広いプロセス条件が相まって、レーザー穴あけ加工にはさまざまな実装方式が生まれています。これらの多くは、大きく2つのカテゴリーに分類できます。すなわち、マルチパススキャンとポイント・トゥ・ポイントスキャンです。

マルチパススキャンでは、ビームは同じ走査パターンを繰り返し実行し、各パスごとに各位置で1回のレーザーパルスを照射します。スキャナが連続的に動作するため、比較的高速な加工が可能です。しかし、連続するパス間での位置ずれが蓄積する可能性があり、その結果、ビア形状にばらつきが生じることがあります。

ポイント・トゥ・ポイントスキャンでは、ビームは各位置へ順次移動し、その都度停止します。各ビアを完全に加工するために必要なすべてのパルスが照射された後、次の位置へ移動します。

これにより位置精度は向上しますが、走査システムが加速と減速を繰り返す必要があるため、速度が犠牲になります(図1)。

これらの手法の実装にはいくつかのバリエーションがあります。例えば、レーザーのガウシアンビームプロファイルを均一(フラットトップ)分布に整形することで、

側壁テーパーの低減を含むビア形状の制御性を向上させることが可能です。ポイント・トゥ・ポイントスキャンシステムで用いられる別のバリエーションとして、音響光学(AO)変調器を使用して連続するパルス間でビーム位置を高速にディザリングする方法があります。これにより、トレパニングやクロスハッチングによって、ビーム径よりも大きなビアを加工することが可能となります。この技術は、さまざまなビアサイズに対して非常に高いスループットを実現しますが、同時にコストが高く、システムも複雑になります。

これらの手法は、特定の条件下では性能を向上させることができますが、速度、精度、およびシステムの複雑さの間にある根本的なトレードオフを解消するものではありません。さらに、ビア径が10-15 μm 程度、あるいはそれ以下へと小さくなるにつれて、これらのトレードオフの管理は一層困難になります。

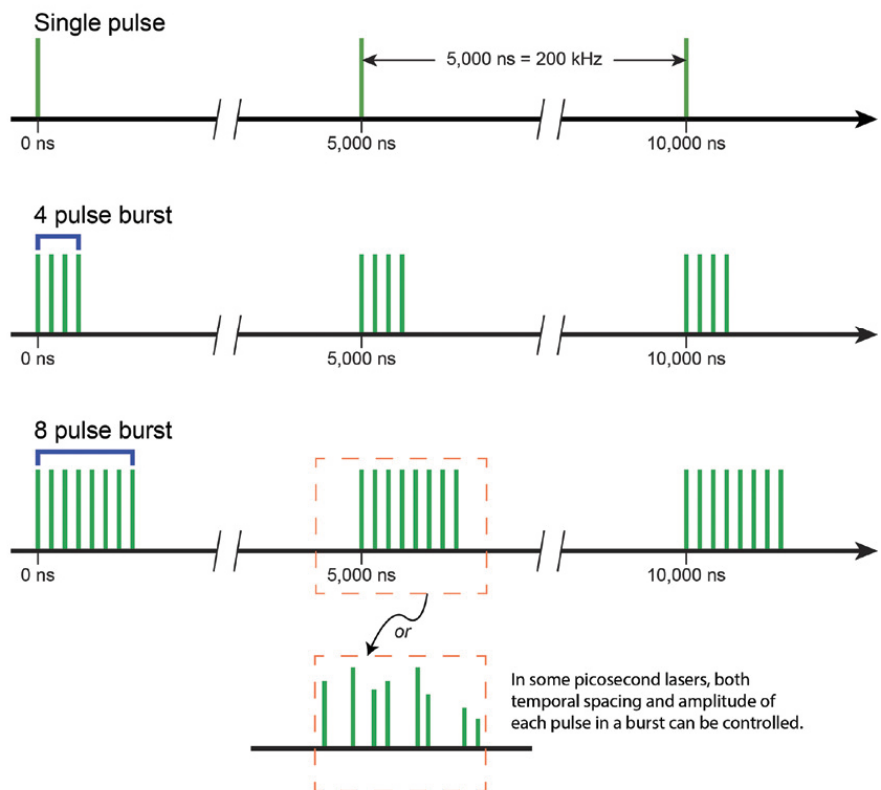


図2. バーストモードでは、ピコ秒レーザーは単一パルスではなく、一連のサブパルスを発生します。Spectra-Physics® IceFyre®のような一部のピコ秒レーザーでは、各サブパルスの時間間隔と振幅の両方を高精度に制御することが可能です。

ピコ秒レーザーという代替案

ナノ秒レーザー加工の多くの制約は、超短パルス (USP) レーザーを使用することで克服できます。その主な理由の一つは、ピコ秒レーザーが材料除去における熱的影響をほぼ完全に排除し、「コールド」アブレーションによって加工を行うためです。

これは、ピコ秒レーザーの非常に短いパルス持続時間 (通常 10 ~ 15ps) により、ナノ秒レーザーよりもはるかに高いピーク出力が得られるためです。

この高いパワー密度は非線形吸収プロセスを引き起こし、バルク加熱によるアブレーションではなく、化学結合を直接切断することを可能にします。さらに、パルス持続時間が非常に短いため、除去された材料は、残留熱が周囲の誘電体に十分に拡散する前に放出されません。

ピコ秒レーザーのもう一つの大きな利点は、特に高スループットが求められる ABF の穴あけ加工において、バーストモード動作が可能である点です。バーストモードでは、レーザーは単一の高エネルギーパルスではなく、時間的に近接した複数のサブパルスを連続して出力します (図 2)。パルスバーストが多くの材料においてアブレーション速度を向上させることはよく知られており、同時に、表面粗さや熱影響部 (HAZ) などの観点で USP 加工特有の優れた加工品質も維持することができます。

ABF の穴あけ加工においては、バースト内のサブパルス間の時間間隔が短く、かつパルスエネルギーが高いことにより、ピコ秒レーザーは新しいタイプの加工プロセスを可能にします。このハイブリッド技術は「バースト・オン・ザ・フライ」穴あけ加工と呼ばれます。

バースト・オン・ザ・フライでは、スキャナは走査パターンを一度だけトレースします。ビームは停止や再起動を行うことなく連続的に移動します。

所望の各位置で、レーザーは多数のサブパルスからなる単一のパルスバーストを照射し、その合計エネルギーは材料を完全に貫通するのに十分なものとなっています。ビームが移動し続けているにもかかわらず、生成される穴は円形 (またはほぼ円形) になります。これは、バースト全体の持続時間がビームの移動速度に比べて十分に短いためです。

バースト・オン・ザ・フライによる穴あけ加工は、既存のスキャン手法の利点を組み合わせつつ、それぞれの欠点を回避します。すなわち、マルチパススキャンの速度とポイント・トゥ・ポイントスキャンの精度を兼ね備えています。そのため、ABFマイクロビアの高歩留まりかつ高スループットな生産を実現するための有効な手段となります。

バースト・オン・ザ・フライの最適化

MKS は ABF に対するピコ秒レーザーのアブレーション特性を調査し、バースト・オン・ザ・フライ加工が実際に利点をもたらすかどうかを確認するための試験を実施しました。試験に使用された材料はすべて銅張積層板 (銅クラッドプリプレグ) 上に形成された厚さ 10 μm の GL102 ABF であり、目標とするビア径は 15 μm でした。

使用されたレーザーは、MKS Spectra-Physics の IceFyre UV50 で、355 nm の波長において平均出力 50W を発振します。

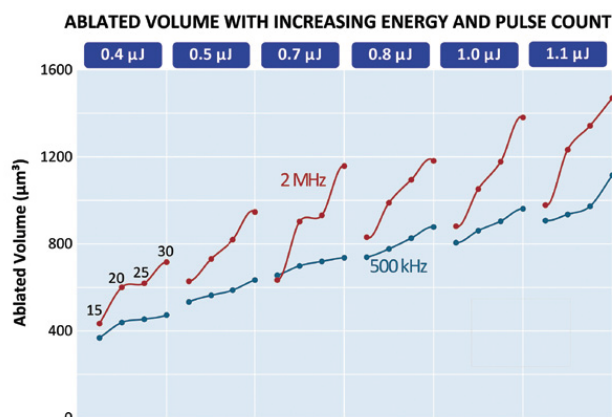


図3. 総パルスエネルギー、総パルス数およびパルス周波数の関数としてのABFの材料除去量を示しています。各パルスエネルギー (列見出しに表示) ごとに15、20、25および30個のサブパルスからなるバーストのデータがプロットされています。

パルス幅は約10psであり、最大10MHzの繰り返し周波数で動作可能です。光学系を用いて、作業面上でビームを約14 μm のスポットサイズに集光しました。レーザーのガウシアン強度分布は変更されていません。

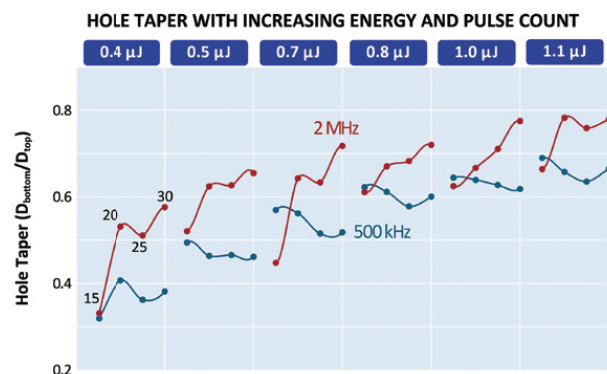


図4. 穴のテーパーは、総パルスエネルギー (列見出しに表示)、総パルス数、およびパルス周波数の関数として示されています。各パルスエネルギーにおいて15、20、25および30個のサブパルスからなるバーストのデータがプロットされています。

予想通り、より高いパルスエネルギーを用いることで、より多くの材料が除去されました。しかし、使用するサブパルス数およびそれらの時間間隔にも強い依存性が見られました。明らかに、サブパルス数が多く、かつ時間間隔がより短い場合に、最も高いアブレーション体積が得られました。

図4は、同じ試験で取得されたデータから算出した穴のテーパー（ピア加工において穴底部の直径を穴上部の直径で割った値として定義）を示しています。この指標では、値が1の場合、テーパーがまったくないことを意味します。

ここでもやはり、サブパルス間隔がより短い場合(2MHz)の方が、全体的により良好な結果が得られます。また、この周波数では、パルスエネルギーが高く、かつパルス数が多いほど、通常はテーパーが改善されます。一方で、サブパルス間隔が大きい周波数(500kHz)においても、パルスエネルギーの増加に伴ってテーパーは改善されますが、この周波数では、パルス数が増えるにつれてテーパーは悪化する傾向が全体的にあります。

銅に関する考慮事項

ABFを可能な限り高い速度(単位時間あたり最大の除去体積)で除去し、かつテーパーを最小にすることが望ましい一方で、ピア加工においてはもう一つ重要な要素があります。それは、下地の銅に対する損傷を与えないことです。

MKSの研究者によってピコ秒パルスによる銅のアブレーションに関する広範な試験がこれまでに実施されており、本研究ではその結果が指針として参照されました。これらの過去の試験データは図5にまとめられています。

このグラフは、1つのパルスをより多くのサブパルスに分割することで、一般的に銅のアブレーション速度が増加することを示しています。特に重要な点として、すべてのサブパルス数において、パルス間隔が約40~50ns(25~20MHz)付近で、銅のアブレーション速度が局所的に最小になることです。アブレーションは、この最小値よりも短いパルス間隔(より高い周波数)では急激に増加し、それよりも長い場合には緩やかに増加します。

なお、グラフの横軸の上限である500nsというパルス間隔は、ABFの体積アブレーション試験で使用された2MHzのパルス周波数に対応しています。

本研究における銅上のABFアブレーション試験でも、同様の現象が観察されました。その結果は、図6の一連の写真にまとめられており、3つの異なるピアの上面および底面(露出した銅表面)を示しています。

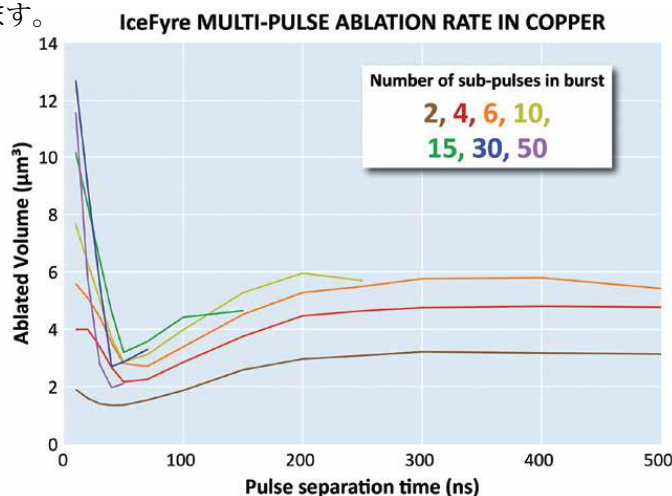


図5. 一定のパルスエネルギーにおける銅のアブレーション速度を、バースト内のサブパルス数およびそれらの時間間隔の関数として示したものの。

3つのピアはいずれも、同一の総パルスエネルギーおよびサブパルス数(30)で加工されています。これらの違いは、サブパルス間の時間間隔のみです。

左端の写真では、テーパーが大きく、さらに銅に対する顕著な損傷が見られます。中央の写真では、サブパルス間の時間間隔を大幅に長く(10nsではなく100ns)することで、銅が効率的にアブレーションされる領域から外れ、その結果、銅の損傷が抑制されています。しかし、穴のテーパーは改善されていません。さらに、バースト全体の持続時間が長くなるため、その間にスキヤン中のビームが移動してしまい、加工された穴が目に見えて長く伸び、円形度が規格外となる状態を引き起こします。

右端の画像は、本ケースにおける最適なプロセス条件を示しています。

サブパルス間隔を中間値である40nsに設定することで、銅への損傷を防ぎつつ、テーパーが最小で真円度の高いピアを形成することが可能となっています。これらの結果は、バーストパルスの時間間隔がアブレーション品質に大きな影響を与えることを明確に示しており、ABFのピア加工においては、バースト特性を完全にプログラム可能なレーザーが不可欠であることを裏付けています。

考察と展望

バーストモード動作で可能となる高い繰り返し周波数は、単位時間あたりに照射されるパルス数を増加させることで、スループットを向上させることは明らかです。しかし同様に重要なのは、サブパルス間の時間が短いことによって、照射部位における熱的環境も変化するという点です。

サブパルスの間隔が十分に短い場合、特に銅界面付近で局所的に熱が蓄積されることがあります。ABFマイクロピア加工においては、この効果により加工速度が向上するとともに、テーパーの低減にも寄与します。

IceFyreのように、各サブパルスの周波数(時間間隔)と振幅の両方をプログラム可能なレーザーを用いれば、この効果を最大限に活用するようにパルスバーストを設計できると考えられます。例えば、バーストの終盤に向けてサブパルスの振幅を徐々に低減することで、銅への損傷をさらに抑えることが可能かもしれません。さらに、サブパルス間隔を短縮することと組み合わせることで、アブレーション速度を一層最適化できる可能性があります。

TimeShiftバースト機能は、真に柔軟で多面的なツールであり、プロセスの最適化をユーザーに創意工夫に委ねるものとなっています。特定の材料スタックにおける個別のプロセス要件に対応するために、レーザー出力を精密に最適化することが、今や可能となっています。

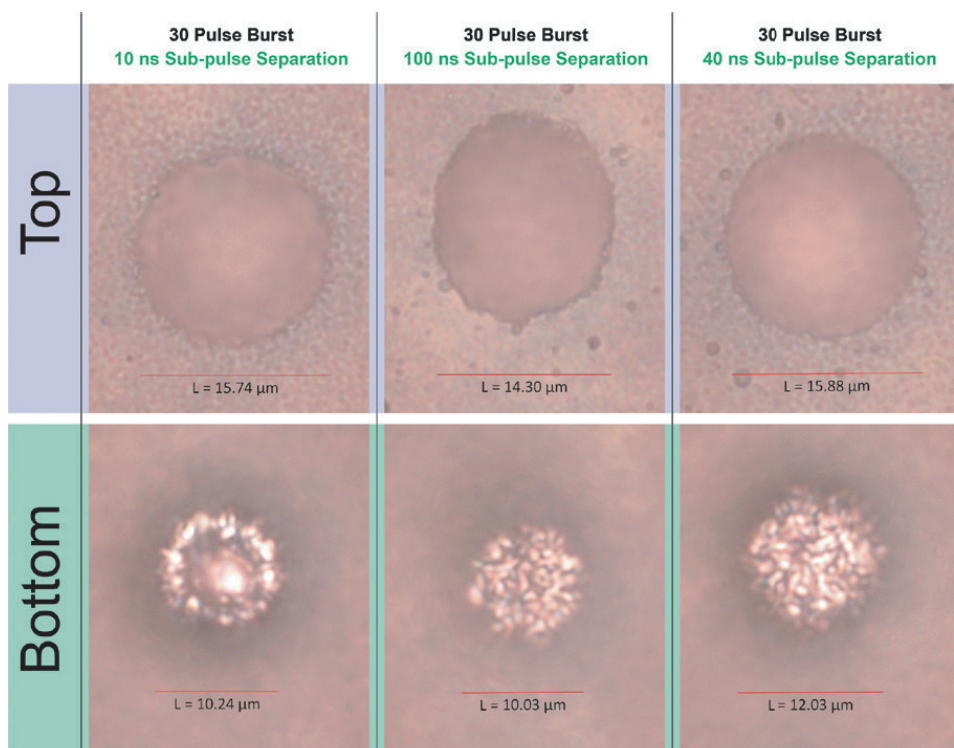


図6. 同一のパルスエネルギーおよびサブパルス数で加工した3つのビアの比較。サブパルス間の時間間隔のみが異なっています。この結果は、サブパルス間隔が加工結果に大きく影響することを示しています。

可能にします。

さらに、高繰返し周波数でのパルス照射により、バースト・オン・ザ・フライ加工を実現できます。これは、従来のUVナノ秒レーザーに基づく手法と比べて、速度と精度のより優れた両立を可能にする新しい技術です。

著者について

Jim Bovatsekは米国カリフォルニア州ミルピタスにあるMKS Spectra-Physics産業用アプリケーションラボにおいてアプリケーションエンジニアリング部門のシニアマネージャーを務めています。

現時点では試験は限定的にしか実施されていませんが、これらの結果は、ピコ秒レーザーがABFビア加工を向上させる可能性を有しているこ

とを明確に示しています。UVナノ秒レーザーと比較して、ピコ秒レーザーは熱影響部 (HAZ) を低減し、より制御された材料除去を



VERSATILE INDUSTRIAL LASERS

次世代パッケージの高度な接続を実現

Spectra-Physics®の高出力UV、グリーン、IR 微細加工用レーザーは、先進的なパッケージにおける複雑な配線接続の実現を可能にしています。当社の幅広いナノ秒、ピコ秒、フェムト秒の産業用レーザーは、優れた性能と汎用性を備え、高密度インターコネク (HDI) および先進パッケージ用途に対するソリューションを提供します。さらに、高繰返し周波数領域で優れた性能を発揮する信頼性とコスト効率に優れた設計により、厳しい量産環境においてトータルコストの低減を実現します。

- EV回路の加工
- ABF 切断、穴あけ
- ガラス貫通ビアインターポーサー
- 先端SIP多層パッケージ加工

For more information visit www.spectra-physics.com
or via email sales@spectra-physics.com



www.spectra-physics.com

mks | Spectra-Physics