

精密加工の可能性を広げる超短パルスレーザー

フラットパネルディスプレイやフレキシブルプリント基板の製造において、効率的で精密、そして熱影響を抑える特性を持つ超短パルスレーザー技術の応用が注目されている。

MKS INSTRUMENTS 社
HERMAN CHUI、JIM BOVATSEK

レーザー技術はこれまで、家電製品やクリーンエネルギー、自動車から医療機器まで、さまざまな業界の製造用途に好影響を及ぼしてきた。調和のとれ、環境にも優しいレーザー技術は、精

密で複雑な形状の加工を要する様々な用途で貢献してきた。

超短パルス (USP) レーザーは感光性材料や構造体に対して熱損傷を最小限に留めながら正確に加工を行うことができることから、近年では工業生産に利用され始め、現在では、超短パルスレーザーによる多彩な用途でのプロセス最適化、スループットの向上、所有コ

ストの低減が可能となり、大量生産用途に多く導入されている。

中でもフラットパネルディスプレイとフレキシブルプリント基板 (PCB) の2つの用途では、素材の持つ特性によって、速さ、そして効率的で正確なスループットが要求されるため、USP レーザー技術が特に注目を集めている。

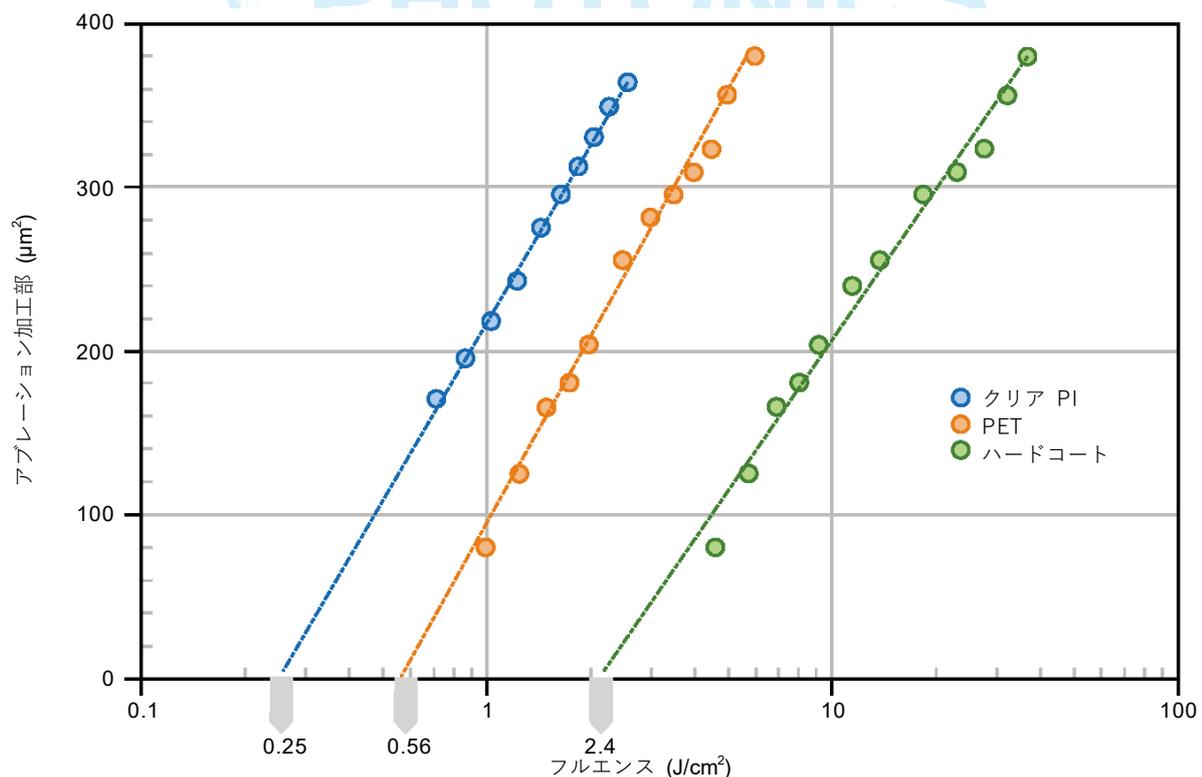


図 1. アブレーション加工部とレーザーフルエンスの図。切断するスタック内の3種類の材料 (クリア・ポリイミド (PI)、ポリエチレン・テレフタレート (PET)、ハードコート) の閾値の差異を示している。

フラットパネルディスプレイ

ここ 10 年の間に、LCD ディスプレイ、さらには OLED ディスプレイの切断や修正にまで、USP レーザーの活用が増加している。また、外形切断加工やスマートフォン用 OLED ディスプレイ画面上のフロントカメラ穴の切り出しにも用いられている。USP レーザーは、使用される素材 (OLED の場合は温度感受性の高いポリマー) に熱損傷を与えることなく、切断を行うことが可能であり、修正においては、隣接するピクセルに損傷を与えることなく、輝点欠陥を修正することができる。

フレキシブルや折りたたみ式の OLED ディスプレイの登場によって、新たな製造上の課題が発生している。例えば、小型の折りたたみ式スマートフォンを製造するには、OLED パネル、タッチセンサー、偏光板、カバーウィンドウ等、ディスプレイ内の各コンポーネントの曲げ半径を小さくする必要があり、USP レーザーは、こういったディスプレイの切断や修正にも有用であり、熱影響 (HAZ) を減らすことで折りたたみ部分の信頼性を確保するなど、プロセスのさらなる改善も可能としている。

スマートフォンのタッチパネル部分については、超薄型ガラス等や新しい透明ポリイミド (PI) といった素材が開発され、いずれの素材も可視波長における高い透明性を有している。ガラスは本来スクラッチがつきにくい一方で、非常に脆いため、この用途で要求される薄さ (<50~200 μm) での製造や取り扱いには困難である。透明なクリア PI は本質的に柔軟性に優れており製造性上の利点は大きいものの、耐スクラッチ性を向上させるために薄いハードコート層で覆う必要がある。いずれの素材も、折りたたみ式ディスプレイ市場で今後も強い存在感を示すことが予想される。

超薄型ガラスの切断については、赤外ピコ秒レーザーを用いたベッセルビーム処理が実行可能な選択肢である。一方で、ハードコートを施したクリア PI については、より高度なアブレーション切断法が要求される。

MKS Instruments による最近の研究において、高出力ピコ秒パルス UV レーザーを用いて PI とハードコートの両方を加工するこのアブレーション法の実

行可能性が実証された。この方法によって、折りたたみ式ディスプレイのカバーウィンドウに用いられるクリア PI ベースの多層スタックに対し、アブレーション切断加工を行うことが可能となった。

スタックは、片面 12 μm 厚のハードコート層と 50 μm 厚のポリエチレン・テレフタレート (PET) ポリマーの保護層が施された 50 μm 厚のクリア PI フィルムから成り、PET ポリマー保護層には 4 μm 厚の感圧接着剤がコーティングされている。

ハードコートフィルムは高機能なコーティングであり、高硬度ガラスやセラミックナノ粒子等、無機元素が埋め込まれた有機重合膜であることが一般的だが、耐スクラッチ性や耐指紋性、防

眩性等のさまざまな機能が設計されている場合もある。

クリア PI 層は、従来のポリイミドの優れた機械的強度と耐熱性を備えながら、可視波長スペクトル全域で高い透明度を有している。PET 層はディスプレイ全体の加工フェーズの間は保護膜として機能し、最終的にはエンドユーザーによって除去される。

従って、PET の切断が高品質であることは重要だが、必須ではない。一方で、外側のインタフェース面となるハードコート層については、高い品質が必要不可欠である。この表面の品質は、ユーザーの利用のために限らず、ディスプレイの取り付けや固定のためにも、潜在的に重要となっている。

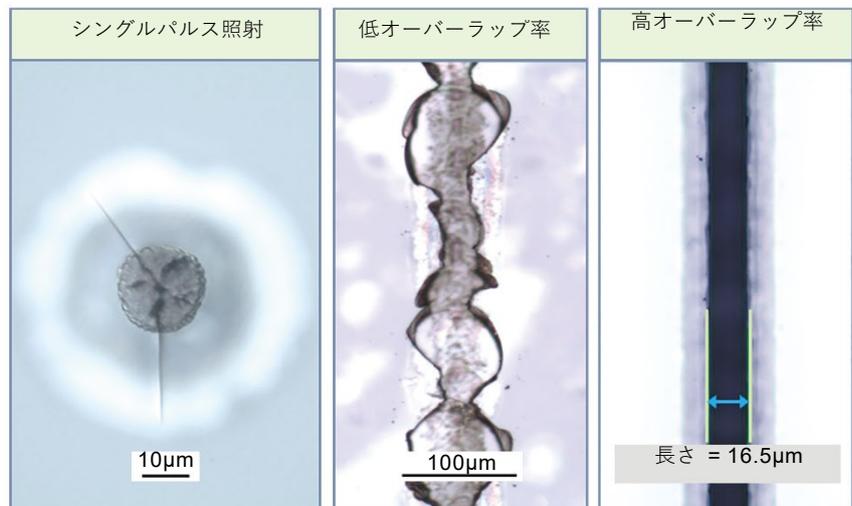


図 2 ハードコート材にシングルパルス照射を行うと、クラックが生じる可能性がある (左)。一般的には緩やかな加工法と見なされる、中程度のフルエンスでパルスのオーバーラップ率が低い場合であっても、スクライプ全体に沿って深刻なチッピングが発生している (中央)。オーバーラップ率が高くパルス幅が狭いプロセスでは、品質が劇的に向上している (右)。

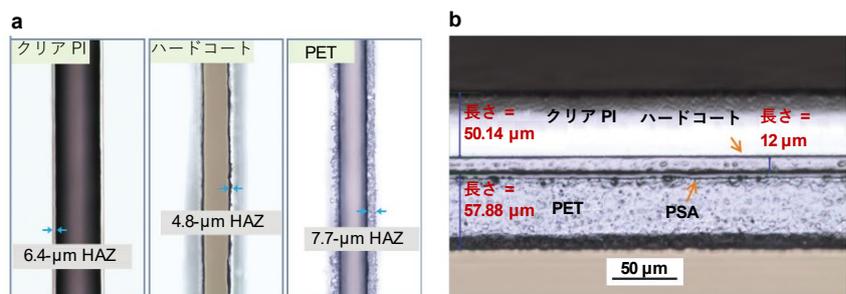


図 3 顕微鏡画像 (a) は、層別の切断加工においてピコ秒パルス UV レーザーで切断したクリア PI (左)、ハードコート (中央)、PET (右) を示している。50- μm 厚のクリア PI 層、12- μm 厚のハードコート層、5- μm 以下の感圧接着 (PSA) 層、50- μm 厚の PET 層 (b) から成る多層スタックの断面図。いずれも 400m/s を超える全体的な (正味の) 切断速度で切断後、溶融や剥離は生じていない。HAZ: 熱影響部

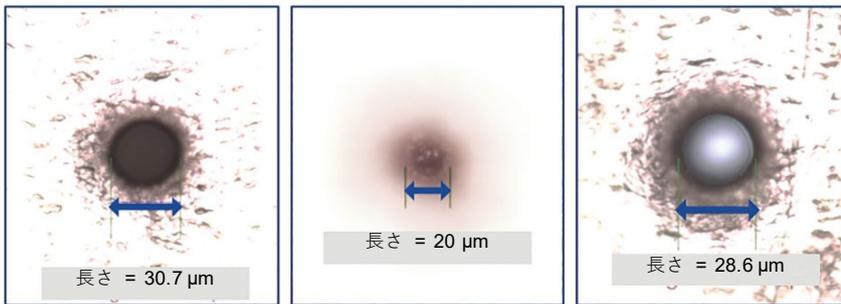


図4. 顕微鏡の焦点を上部の銅(左)および下部の銅(中央)に合わせた場合の、銅/改良型ポリイミド/銅はくに見られるブラインドピア。上部の銅表面(右)には貫通ピアが撮像された。

多層スタック切断時の適切なパラメータを決定するにあたって、Liuの手法¹に基づくシングルパルス照射試験から、スタックの各層に対するアブレーション閾値を策定した。

これらの閾値は、図1に示す通り、3つの主な層の間で大きく変わる可能性があり、この点はフルスタック切断プロセスの開発において大きな課題となっている。

ハードコート層のアブレーション閾値は、クリアPIに対する閾値よりも10倍高くなり、PETの閾値はその2つの間に位置している。ハードコートフィルムの高い閾値は、各種ガラスで見られるものと同様であり、この素材の脆性を示している。そのため、ハードコート材へのシングルパルス照射でクラックが生じる可能性がある(図2、左)。一般的には緩やかな加工法と見なされる、中程度のフルエンスでパルスオーバーラップ率が低い場合であっても、スクライプ全体に沿って深刻なチップングが発生した(図2、中央)。素材のフルエンスとパルスのオーバーラップ率に合わせて慎重に最適化を行ったところ、ハードコート層全体で非常に平滑なスクライプが実現できた(図2、右)。

3つの素材それぞれの閾値や全体的なアブレーション挙動に関する知見を高めることで、MKS Instrumentsの研究がフルスタック切断におけるプロセス最適化を導いた。ただし、完全切断加工において、レーザービームはスタックの一つの面(クリアPI)にのみ照射されるため、各素材に対応できるようパラメータの微調整が必要となる。連続する各層には、それぞれ異なるパルス出力、パルス周波数、走査速度を独自に組み合わせて適用する必要があった。ピコ秒UVパルスによるアブレーション挙動は非常に再現性が高く、アブレーション深さのリアルタイム監視は不

要であり、一方で、最終的な切断プロセスにおいては、レーザーパルス出力、パルス周波数、走査回数等のパラメータを事前にプログラム化することが可能である。走査速度を3~10m/s、レーザーパルス周波数を最大3MHzとしたところ、400mm/sを超える実効速度で高品質な完全切断を達成した。図3aにはクリアPI層、ハードコート層、PET層の切断部を、また図3bには切断部の断面を示している。

熱影響部の最小化

全てのHAZは10μm未満であり、切断プロセスの品質の高さは明確である。特に、最も課題の多いハードコート層のエッジのチップや粗さは5μmを下回っている。PETフィルムのHAZはやや大きいものの、重要ではない。なぜならPETフィルムはただの保護カバーフィルムであり、後に除去され、高機能で

耐スクラッチ性のあるハードコート層が露出するためである。切断箇所内壁の壁面は完成したディスプレイを端末に搭載する際の接触面となる可能性があるため、その品質も重要となる。断面図から、材料スタックの全体を通じて切断加工の品質が保たれていることが確認できる。非常に薄い感圧接着剤も含め、各層は明確に区別可能であり、スタック内での層間溶融、汚れ、剥離は認められない。

超短パルスレーザーの他の重要な用途として、スマートフォン、スマートウォッチ、その他多くのウェアラブル製品を含め、さまざまな民生品に用いられるフレキシブルPCBの製造である。

レーザーは、フレキシブルPCBの製造には不可欠であり、デバイス個片化のための形状切断(ルーティング)や銅の穴あけ加工などが一般的な用途である。最近では、より新しい素材によって、フレキシブルなPCBの製造が5Gワイヤレス通信の進展に対応できるようになってきた。エポキシ樹脂とポリイミドの複合材である変性ポリイミド(MPI)や液晶ポリマー等、誘電率の低いポリマー材料が必要だが、USPレーザーはこのような素材の加工に要求される品質、精密さ、スピードといった条件を満たしている。

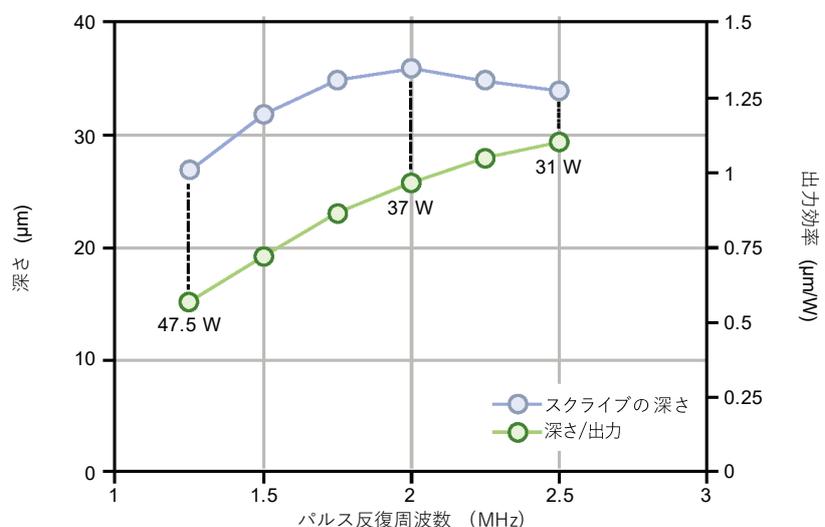


図5. スキャン速度 1.5-m/s、50Wで動作するピコ秒UVレーザーを照射した後のスクライプ深さおよび深さ効率対パルス反復周波数を示す図。選択された条件におけるインシデント平均出力についても記載する。

MKS Instruments は別の研究で、高出力ピコ秒 UV レーザーを用いて、銅/MPI銅からなる積層材にマイクロビアを形成するパーカッション穴あけ加工を行った。プログラマブルパルス機能によって、積層板内にブラインドビアやスルービアを加工するためのパルス生成や平均 50-W UV の出力が可能となった。

ブラインドビアの穴あけ加工については、上部の 12- μm 厚の銅層と中央の 25- μm 厚 MPI 層を貫通し、裏側の 12- μm 厚の銅層手前で停止するまで、わずか 21 回のパルスパルスで達成した。これは、毎秒 16,500 個以上のビアを処理する高速ドリルの速度と同等である。スルービアの穴あけ加工については、3 層全て 35 パルスパルスを用いてアブレーションし、毎秒 10,000 穴レベルのスループットを実現した。

図 4 に、形成された 2 種類のビアの光学顕微鏡画像を示す。いずれのビアタイプも、上部の銅表面の HAZ を最小限に抑え、アブレーション箇所の周辺に、顕著なバリは認められなかった。ブラインドビアは上部銅層および MPI 層へのクリーンなアブレーションであることを示している。アブレーションは底部の銅層で留まり、損傷を最小限に抑えている。

液晶ポリマーのレーザー切断に対する同様の評価では、高出力ピコ秒 UV レーザーを用いて、さまざまなパルス周波数で 45~50- μm 厚の液晶ポリマーシート材への幾つかの条件でスクライブ加工を行った。

結果として得られた深度データおよび深度効率の算定値（すなわち、単位出力当たりの深度）とパルス周波数を図 5 に示す。パルス周波数が 1.25-MHz 時の平均出力は 47.5W であるのに対し、このときの平均出力は 37W であったにも関わらず、パルス周波数 2-MHz のレーザー動作時に、シングルパス・スクライブ深度の最大を記録した。これは直観に反するかもしれないが、後者のパルスエネルギーは低いものの、パルス当たりの除去率は同等である。さらに、毎秒パルス数は大幅に高く、この差異を補って余りあるほどである。

また、深度と出力効率の指標は、パルス周波数の増加と、それと同時に生じる出力の低減に伴って、上昇し続けるが限界はある。パルス周波数が 2 MHz を超える場合には出力が十分に低くなり、プロセスが効率的であってもスクライブは深くならない。

所要の集光条件において、確立され

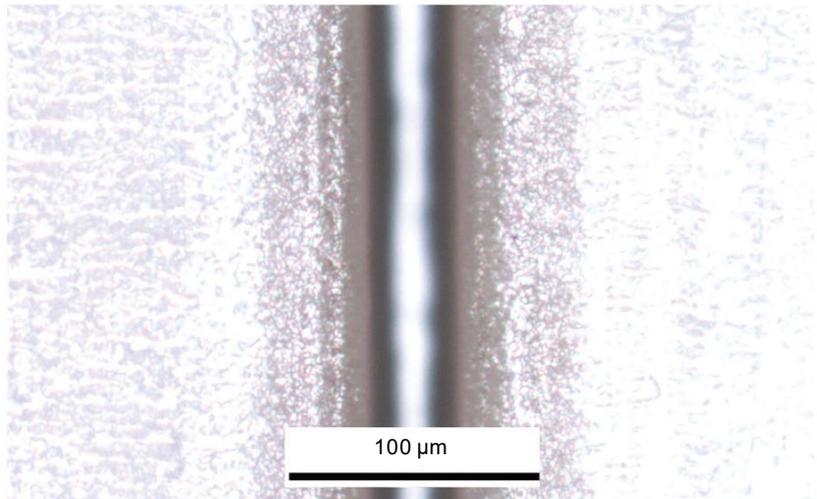


図 6. シングルパス、走査スピード 1-m/s で 45~50 μm 厚のベア液晶ポリマーシート材を全切断

た最も効率的なレーザー動作条件を用いて、より遅い走査速度でスクライブを形成し、これによって素材の全切断を行う最高速度を決定した。その結果、切断速度は 1 m/s で図 6 に示すような高品質な結果を得られた。

今後の方向性

高品質な微細加工やより細かい処理に対する需要が高まる中で、USP レーザーは、フラットパネルディスプレイやフレキシブル PCB などの家電産業全体の製造工程の他、クリーンエネルギーや医療機器といった他の応用分野でも普及が進んでいる。USP レーザーの機能や所有コストの改善に従って、プロセスのスループット、品質、コストの優先度が圧倒的に高い用途から利用が広がってくると予想する。厳しさを増す要求と、日々進歩するレーザーの機能が交わる中、大量生産の用途へ超短パルスレーザーが導入されることが期待される。

執筆者

MKS Instruments 社
Light & Motion 部門マーケティング担当シニアディレクター
Herman Chui
メール：herman.chui@mksinst.com

MKS Instruments 社
Spectra-Physics レーザー担当アプリケーションエンジニアリングマネージャー

Jim Bovatsek

メール：jim.bovatsek@mksinst.com

参考文献

1. J.M. Liu (1981). Simple technique for measurement of pulsed Gaussian-beam spot sizes. Opt Lett, Vol. 7, Issue 5, p. 196.