

フェムト秒ファイバレーザ 超薄型ガラスとポリマーの加工を改善

パトリシア・パンチャク

速度や効率を損なうことなく、より高いエッジ品質を実現するため、新しい用途に適用できる可能性がある。

ポーランドのフルエンス社 (Fluence) の研究者らは、ガラスとポリマーのレーザクリービング (劈開) の本質的な課題を克服することを目指して、ウルトラファーストフェムト秒ファイバレーザを使用する、合理化された技法を開発した。この手法は、方向に依存しない劈開を、高いエッジ品質と細かいカーブ幅で、高速 (厚いガラスの場合でも1秒あたり数メートル) に行う。また、デブリ/ヒュームを生成しないため、環境に優しい手法である。

試験により、サファイアを含むさまざまな材料と、ディスプレイや民生エレクトロニクス市場の大半のガラス用

途 (携帯端末のカバーガラスや、フォルダブルディスプレイ用の超薄型ガラス [Ultra-Thin Glass : UTG] など) に、この手法が適用できることが示されている。UTG に対しては、250fs のパルスを使用するだけで100nm 未満の表面粗さが達成できることが実証されている。

ポリマー加工では、特に医療グレードのポリ乳酸 (polylactide : PLA) とアクリル樹脂 (PMMA) に対して、250fs よりも短いパルスでこの手法を適用することが、熱蓄積の問題、すなわち、厚いポリマー基板の切断速度が低い問題の克服に有効である。研究者らは、

標準的なポリマーアブレーション切断プロセスと比べて、数ケタ高い切断速度が得られることを実証した。

具体的には、多様な材料を劈開する際のパルス幅、バーストエネルギー、バーストあたりのパルス数、ピッチなど、さまざまなパラメータを試験する実験を行い、次の3つの結果が得られた。

1. 亀裂を自己進展させる方法で劈開したさまざまな材料のエッジ品質に対する、プロセスパラメータの影響⁽¹⁾。エッジの粗さは、加工後の材料の強度に影響を与え、それは、フォルダブルディスプレイのような用途において、非常に重要な項目である。

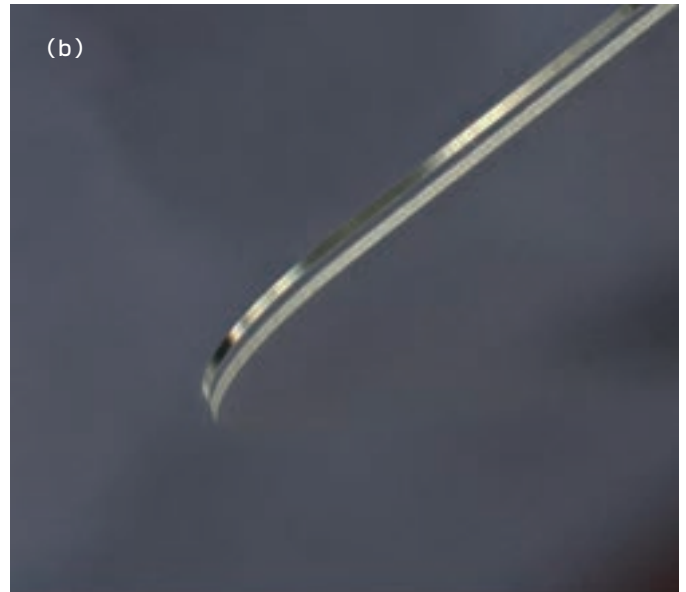
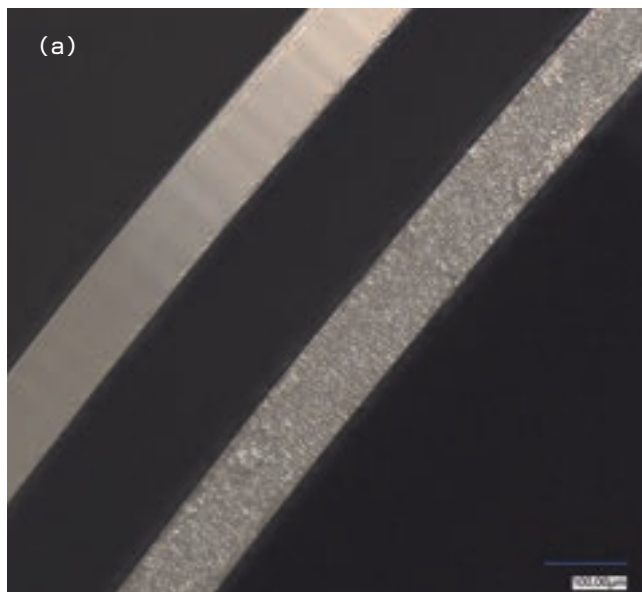


図1 (a)は、厚さ100 μm の超薄型ガラス(UTG)のサンプルの写真。ピコ秒パルスによって得られた粗い切断面(右)と比べて、フェムト秒パルスを使用した場合の切断面(左)は、非常にきめ細かく光沢のある仕上がりとなっている。(b)は、厚さ200 μm のUTGのサンプルの写真(提供:フルエンス社)

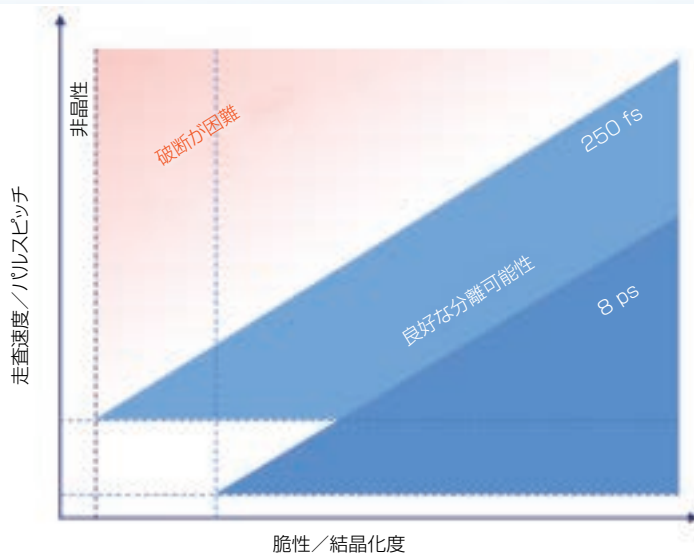


図2 パルスピッチ、パルス幅、さまざまな脆性のポリマーを破断する能力の関係。パルスが短いほど、非晶性ポリマーの加工が可能となり、高い劈開速度が得られる(出典: <https://doi.org/10.2351/7.0000798>)

- 丸みを帯びた形状を製造している場合などに、アクティブなビームステアリングを適用することなく、任意の方向に高速に劈開することが可能で、方向に関係なく、高いエッジ品質が得られる。
- 同一の簡単な設定とレーザー光源を使用して、ガラスとポリマーの劈開が可能である。

実験設定

研究者らは、同社のフェムト秒ファイバレーザ「Jasper X0」を使用した。平均出力レベルを20Wとし、利用可能な出力は200kHzの単一の短パルスでパルスエネルギー 100 μ J、基本波長は1030nmとした。

この試験では、厚さが50 μ mと100 μ mのUTG(図1)、厚さ1.1mmのBK7ガラス、両面にラミネート加工を施したUTG、厚さ0.3mmのPLA、厚さ3mmまでのPMMAの劈開を行った。粗さは、レーザ共焦点顕微鏡「LEXT OLS500」を使用して測定した。

研究者らは、以前発表した全方向性の微小亀裂指向技法⁽¹⁾を使用した。この技法は、切断軌跡に沿った方向に微

小亀裂を確実に自己進展させることで、ビーム経路上の回転光学素子やマスキングを使用することなく、任意方向の切断を可能にするものである。

超高品質のUTG劈開の実現

UTGの劈開を試験するために、研究者らは、ピコ秒パルスを使用して亀裂を自己進展させる方法と、複数のパラメータセットを使用した今回の新しい方法を比較した。Jasper X0レーザが生成できる最も短いフェムト秒パルスである、250fsの短いパルス幅と、十分に最適化されたパルスピッチによって、厚さが50 μ mと100 μ mのUTGを簡単に分離して、Sa=0.15 μ m未満のエッジ粗さ、すなわち、基本的に光沢のあるエッジが生成できることを示す結果が得られた。最大限の品質を得るには、UTGの厚さに応じてレーザパラメータを変更することが必要だと、研究者らは述べている。

フルーエンス社のウルトラファーストレーザ応用研究所(Ultrafast Laser Application Laboratory)で、レーザ微細加工担当R&Dディレクターを務めるボグシュ・ステパック氏(Bogusz

Stepak)は、測定値は顕微鏡の限界値だったため、粗さはその測定値よりもさらに低い可能性が高いと考えている。エッジの粗さが、非常に低いことは好都合である。「粗さとUTGの曲げ強度の間には、非常に強い相関関係があるためだ」と、ステパック氏は語っている。

興味深いことに、新しい方法では微小亀裂は生成されない。それは、ピコ秒パルスを使用する場合は不可能なことである。「パルス照射後に、材料内部のエネルギー緩和による亀裂が生じない。これは異なる種類の改質であり、これらの改質を互いに近づけて起こすことにより、改質ガラスの均質なラインを生成して、そのラインに沿ってガラスを破断することで、非常に高いエッジ品質を得ることができる」と、ステパック氏は述べている。ただし、なぜこのプロセスがそのように機能するのかを完全に理解して、劈開したガラスの強度を確認するために、さらなる試験を行う必要がある。

90 μ mのUTGガラスコアを、2つの30 μ mのポリマー層で挟んだハイブリッド材料にこれと同じ設定を適用する

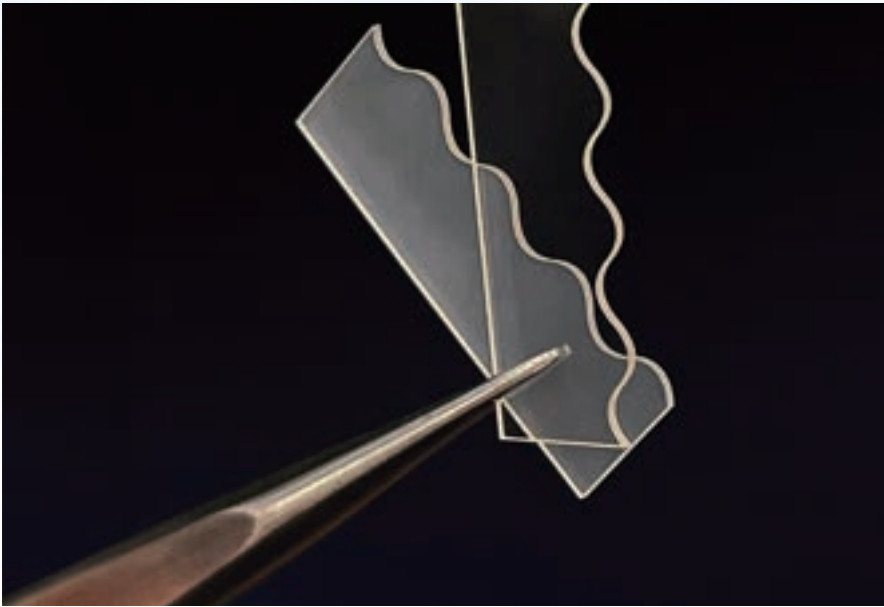


図3 フェムト秒パルスを使用して丸みを帯びた形状に劈開した非晶性と結晶性のPLAの写真。この切断手法をポリマーに適用すると、欠陥のない滑らかな切断エッジが得られることを実証している(提供:フルーエンス社)

と、250fsと8psのどちらのパルス幅でもこの材料を破断することができたが、エッジ品質は250fsのほうがはるかに高かった。

また、この手法では、後処理を行うことなくシングルパスで材料を劈開することが可能で、層間剥離、亀裂、表面汚染は生じなかった。

BK7の加工

厚さ1.1mmのホウケイ酸ガラスについては、エネルギーレベル、パルスピッチ、バーストあたりのパルス数などが異なる、さまざまなパラメータセットを適用し、フェムト秒パルスを使用して、丸みを帯びた形状を劈開した。いずれかのパラメータを少し変更するだけで、品質に影響が生じる。しかし、5.0~7.5 μ mのパルスピッチの3つか4つのバーストにおいて、「ほとんどの産業用途で一般的に十分と考えられる、0.4 μ m未満の非常に高品質な表面粗さが得られる、パルスピッチのスイートスポットが見つかった」と、ステパ

ック氏は述べた。

研究者らは、水平切断と垂直切断の粗さを測定することにより、劈開方向に関係なくこのプロセスで同じ品質が得られるかどうかを評価した。粗さは、どちらの場合も同等だった。「つまり、回転部品が全くないこの非常に簡単な設定で、すべての方向で同じ品質が得られる。これは、簡単な分離を実現する、非常に高品質なプロセスである」と、ステパック氏は語った。

同氏は、パルスピッチを上げれば加工速度を上げることができると付け加えた。100kHzの繰り返し周波数で、UTGと、一般的に厚さ1.5mmまでのガラスを、最大1m/sの速度のシングルパスで加工することができる。300kHzで動作する60WのJasper X0レーザを使用すれば、この値を3倍にすることが可能である。

ポリマーの加工

同じ手法で、厚さ0.3mmのPLAと厚さ3mmまでのPMMAの劈開を行ったところ、有望な結果が得られたと、ステパック氏は説明している。最も短い250fsのパルスを使用する場合に、最も簡単に機械的破断が得られたという(図2)。ピコ秒のパルス幅を使用する場合は、サンプルの破断はほぼ不可能だった。

材料によって、良好な結果を得るために必要なパルスピッチは異なる。「PLAのような半結晶性ポリマーの場合は、材料の脆性が高いため、より大きなパルスピッチでの劈開が可能である。完全に非晶性のポリマーであるPMMAのように、材料の脆性が低い場合は、パルスピッチを小さくする必要があり」と、ステパック氏は述べた。

「非常に短いパルスと、ガラスの場合と同じ光学素子を使用して、ポリマーの劈開を行うことができる。また、この場合も、カーフはなく、材料の損失やヒュームは生じず、実質的に熱影響部は存在しないため、これは、特に医療などの要件の厳しい用途に対して、非常に良好なプロセスである」と、同氏は語った。

この手法は、さまざまな非晶性ポリマー(PMMA、PC)と半結晶性ポリマー(PET、PLA、PA6、PE、PEEK、図3参照)に適用できる可能性がある。今後の試験では、他の加工方法を調査することによって、さまざまな材料の切断品質と速度をさらに最適化して、より複雑なエッジ形状の生成にこのプロセスを適用する方法を明らかにする予定である。

参考文献

- (1) B. Stepak, N. Grudziń, K. Kowalska, Y. Stepanenko, and M. Nejbauer, J. Laser Appl., 35, 012005 (2023); <https://doi.org/10.2351/7.0000798>.