

超短パルスレーザーによって実現される AR用高屈折率ガラスの切断

ルネ・リーバース、マンディ・ゲブハルト、ファビアン・ワグナー

高屈折率ガラスでできた拡張現実(AR)グラスを切断するためのレーザーベースの分離プロセスは、高くて予測可能な曲げ強度を達成し、実験室での利用から量産にまで拡張可能なモジュール式のコンセプト機に組み込まれている。

仮想現実(Virtual Reality: VR)は、別世界を創造することを指すため、ユーザーをVRに没入させるデバイスには、人間の視覚系に適応させたニアアイディスプレイが必要だが、ディスプレイを透視できる必要はない。一方、拡張現実(Augmented Reality: AR)と複合現実(Mixed Reality: MR)は、前者は仮想映像を現実世界に重ねて表示し、後者は仮想映像と現実世界が相互に作用する。ARとMRにはどちらも、ユーザーが現実世界と仮想映像を同時に見ることでできるディスプレイ技術が必要である。

適切なデバイスの光学設計は、ARに伴う最も重要な技術的課題の1つである。ARデバイスの中心にあるのは、ディスプレイまたはプロジェクターによって生成された仮想映像を現実世界

の映像に融合する、光結合器である。しかし、これまで多くのケースにおいて、これらの結合器のフォームファクターが、消費者の日常的な使用に適していることはほとんどなかった。

導波管技術は、この問題の解決策となる可能性がある。光学グレードのガラスでできた平らな基板によって導波管の表面に並行に映像を導きつつ、それと同時に導波管の表面に垂直に光が透過できるようにする技術である(図1)。性能を左右するパラメータのかなりの部分が、導波管の材料と、屈折率、比重、透過率、均質性、平坦性、反りなどのその仕様に依存する。

成熟化しつつあるAR業界は、寿命と信頼性の問題を検討する必要がある。それらの問題は、製品の堅牢性と加工歩留まりに関連する場合が多い。

ガラスの堅牢性は、それが加工された方法による結果である。一般的に、最も懸念されるのは、最終消費者のアイセーフティである。しかし、加工時のガラスの破損も、製造工程の他の部分に影響を与えるリスクがかなり大きい。そのため、高くて予測可能な破断強度を達成して、関連する部品特性を長い製造工程にわたって維持するシングルシェーションプロセスが不可欠である。それを用意することで初めて、製造した製品を最終顧客市場で商品化することができる。

独ショット社(SCHOTT)と独3Dマイクロマック社(3D-Micromac)は、ARグラスに用いられるガラスの加工工程と破壊強度の相互作用をさらに深く理解するために協力した。最終目標は、実験室レベルから量産にまで対応する、費用対効果の高い導波管製造を実現するための信頼性と拡張性に優れたソリューションにつながる、補完的な材料と装置のソリューションをARデバイスメーカーに提供することである。

方法論と実験

レーザープロセスと設定。開発を始めるにあたってまず、量産で実証された切断プロセスを導入することを決断した。レーザー改質切断は、ディスプレイ業界で長年にわたって使用されてきた、広く認められた標準的な製造プロセスであるため、これを選択した。

最初のステップは、既定の曲線(所望の切断ライン)に沿って、ピコ秒またはフェムト秒のレーザーパルスを使用

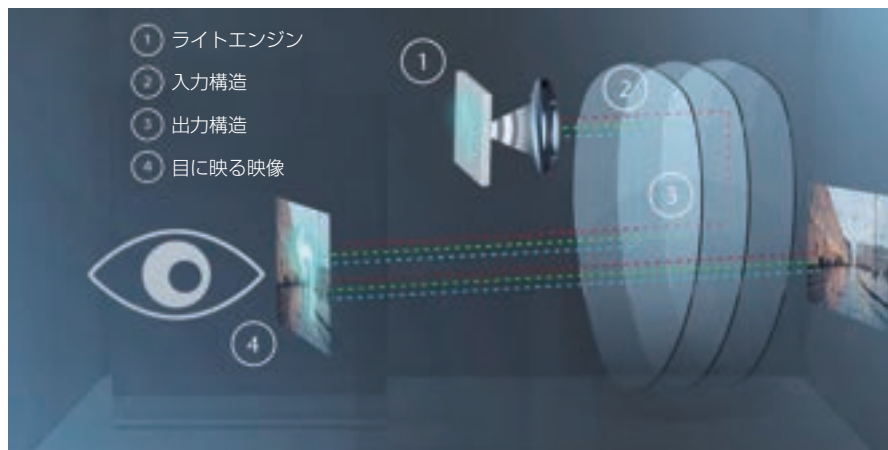


図1 導波管結合器(ライトガイド技術)の機能的原理を示す模式図(画像提供:ショット社)

して、材料の厚み全体にわたってガラスを改質（フィラメンテーション）することである（図2）。各改質点は、単一のレーザーパルスまたはパルスバーストの局所的な照射によって生成される。バーストは通常、非常に短時間の間の多数の独立したパルスで構成され、1回の改質で効果的に作用する。選択したガラスに対し、信頼性に優れた制御された改質プロセスを見つけるために、広範囲にわたる超短パルスレーザー（パルス幅は350fs～20ps）とパルスパラメータを調査した。バーストあたりのパルス数を1個から8個に変更して、累積バーストエネルギーを80mJから270mJに増加させた。また、ピッチ（切断パスに沿った個々の改質点間の距離）を1～10μmの間で変更した。

次に、2つ目の加工ステップでは、切断ラインに沿ってガラスを分離する必要がある。フリーフォーム形状の場合は一般的に、改質点とその周辺材料にCO₂レーザーを照射することによって、必要な応力を印加する。

この実験の結果はすべて、「SCHOTT RealView」ガラスウエハ（屈折率1.8[RealView 1.8]、厚さ700μm）で得られたものである。

強度測定。ガラスの強度は、標準的な4点曲げ試験設定^{(1), (2)}によって、サンプルサイズを45×44mmとして測定した。サンプルの45mmの辺に沿ってこの曲げ試験を行った。しかし、標準的な4点曲げ試験方法には、サンプルの厚さ以上に中心点がずれると直ちに、適用される簡素化されたプレート理論に起因する不正確が生じ、それに応じて絶対的な結果も不正確になるという制約がある。FEM（有限要素法）解析を行い、その結果を使用して、測定荷重から応力への変換を調整した。すべてのサンプルについて、破断

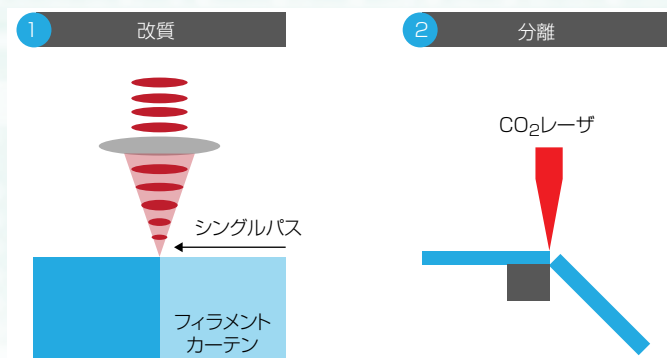


図2 ガラス基板のレーザー切断のプロセスフロー（画像提供：3Dマイクロマック社）

のタイプを確認した。破断起点が平面内にあるサンプルは除外した^{(1), (2)}。

統計と実験計画。3Dマイクロマック社は、上述のレーザーパラメータをさまざまな値に変更することにより、一連の統計的実験計画を行った。4つの応答変数として、レーザーの入射面と出射面の特性値とワイブル係数（Weibull modulus）を選択した。現象学的な観点からは、入射面と出射面で動作は異なることが予想されていた。上述のとおり、それらの相違点を理解して制御することが、信頼性の高い安定したプロセスを確立するために不可欠である。この実験計画では、サンプルの両面を個別に分離および試験することによって、その点を反映した。最初に大まかなパラメータスクリーニングを行い、改良を加えて、その後検証を行った。

実験結果

広範囲にわたるパラメータを対象とした、最初のスクリーニング計画（スクリーニング実行1）の目的は、選択したパラメータによる応答変数を予測するモデルを見つけることだった。複数の実験セットを試した末に、レーザーの入射面と出射面に対する合理的なモデル（ $r^2=0.97$ ）を近似することができた。

最も望ましいプロセスウィンドウを決定した後に、強度値のスイートスポットを探すために、よりきめ細かい実

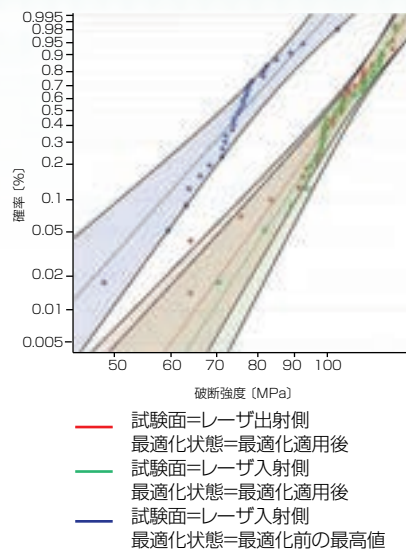


図3 「SCHOTT RealView 1.8」の最適化前後の曲げ強度（画像提供：3Dマイクロマック社）

験（スクリーニング実行2）を行った。ここでも実験を重ねた末に、確実にフィットするモデルを見つけることができたが、そのモデルは、入射面と出射面で大きく異なる特性値を予測するものだった。そこで、入射面と出射面で同一の高い強度値を示すように、プロセスを最適化することにした。

検証結果によって、複数の詳細が明らかになった。まず、ガラスの曲げ強度（図3）は、新しいレーザー改質プロセス（青色ライン）を使用する場合で、以前の結果（赤色／緑色ライン）と比べて30%以上高くなった。

2つ目に、レーザープロセスのこの設計モデルによって、特性値と係数が予

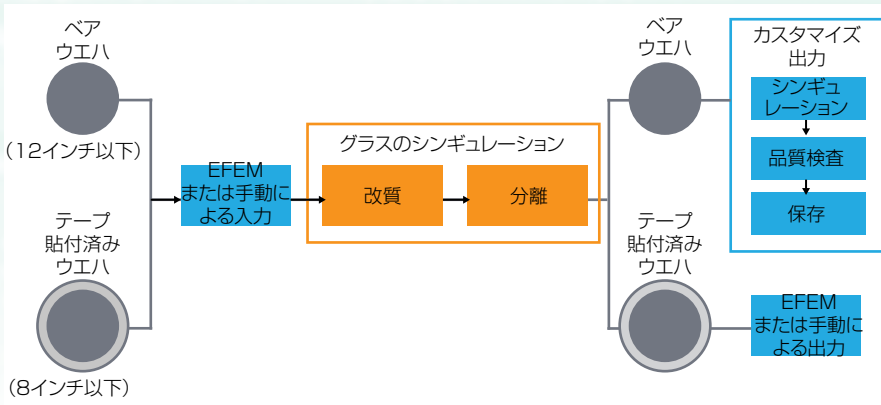


図4 ARガラスをウエハ基板からシンギュレーションするためのワークフロー例の模式図(画像提供:3Dマイクロマック社)

測できるだけでなく、適切なレーザーパラメータを適用することにより、それらの値について所望の結果が得られるように調整できることが、この結果に示されている。図3において、入射面(赤)と出射面(緑)の測定値をそれぞれ表す、赤と緑の分布が類似していることから、それが明らかである。

3つ目に、この結果は、安定した量産対応のレーザープロセスが開発されたことを証明している。このモデルが生成する結果は一貫していて再現性があるため、外挿が可能で、歩留まりや安

定性などの変数に対して、信頼性の高い予測を行うことができる。

この新しいレーザー切断プロセスの結果を検証し、高い再現性が得られることを確認した後、次のステップは、このプロセスを量産に適したコンセプト機に組み込むことだった。このコンセプト機の重要な側面の1つは、プロセスフローに組み込まれた他のコンポーネント(材料供給やハンドリングツールなど)が、プロセスパラメータに悪影響を及ぼさないようにすることだった。

進行中の試験により、このモデルの

設定が、ARガラスに用いられる他の種類のガラスに簡単に転用可能であることが示されている。それはこのモデルが、特定の用途に合わせて効率的にプロセスを最適化するための本質的な基盤であることを示している。

プロセスの組み込み

モジュール式装置。多くのAR顧客がまだ製品開発の初期段階にあるが、ARが量産に向けて進行しているのは明らかであるため、われわれは、アップグレード可能なモジュール式のレーザーシステム(microPOLAR)を設計することにした。このシステムの基盤は、産業界で実証済みの成熟した搬送システムである。これにさまざまなプロセス、ハンドリング、品質検査モジュールを組み込むことにより、高いレベルの柔軟性をユーザーに提供することが可能である。

このレーザーシステムは、ベアウエハ、または接着テープを貼付したウエハを処理することができる(図4)。分離のためのプロセスモジュールは、入力/出力ハンドリングで補完することが可

	オプション1	オプション2	オプション3	オプション4
ピクトグラム				
アプリケーションシナリオ	R&D + 試作		量産	
インフィールドアップグレードの可否		X	X	X
ショット社認証プロセス		X	X	X
寸法 (l × w × h)	3.0 × 1.5 × 2.3 m ³		6.5 × 3.6 × 2.3 m ³	
ガラス1枚あたりのタクトタイム(*)	N/A	45 s	10 s	5 s

* 外周長180mmのガラスレイアウトに基づく

■ microPROプラットフォーム ● MCSプラットフォーム ■ プロセスモジュール ■ ハンドリングモジュール

図5 「microPOLAR」システムのオプションの概要(6インチウエハに4枚のガラスを配置した場合で計算した推定タクトタイムを含む)(画像提供:3Dマイクロマック社)

能である。また、例えば最も処理速度の遅いサブプロセス工程において、同じ種類のプロセスモジュールを複数並列に配置することにより、スループットを上げることができる。

カスタマイズされたマルチキャリアシステムと、搭載されているレーザ源は、既に業界で実証済みのものである。システム設計とワークフローは、ショット社と共同開発したもので、同社の承認を得ている。このシステムは、完全にアップグレードまたはダウングレードが可能であるため、顧客は、完全に自動化されたハンドリングユニットや追加の作業ステーションを、現場で組み込むことが可能である。ローディングプロセスは、SEMI準拠の標準的なウエハハンドリング装置(EFEM)によって行われる。

出力モジュールは、ガラスの破断強度を維持することに特別な注意を払って設計されている。ガラスのエッジがほんの少し損傷しただけでも、デバイスの歩留まりや寿命に悪影響を及ぼす可能性があるためである。

構成とコストの概要。図5は、システム構成の概要を示したものである。オプション1は、最も柔軟性に優れたR&D(研究開発)用ソリューションで、プロセス開発と製品試験のフェーズを対象としている。オプション2,3,4は、顧客のニーズに応じてアップグレードとダウングレードが可能な、上述のマルチキャリアプラットフォームを基盤としている。製品/ガラスは、B2C市場で販売されているデバイスに実装されるため、製造コストは重要な要素である。4つのプロセスモジュールを一列に並べた、完全装備のレーザマシンは、1枚のガラスを約5秒で製造することができる。これにより、最大で約500万枚という年間スループットが得

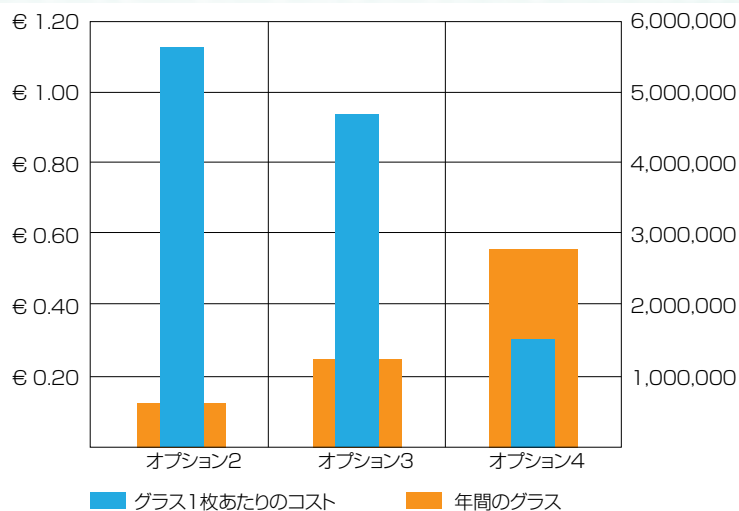


図6 スループットと歩留まりは所有コストに直接的な影響を与える。完全装備のマシンを使用することにより、ガラス1枚あたりの製造コストを少なくとも80%削減することができる(画像提供:3Dマイクロマック社)

られる。

スループットと歩留まりは所有コストに直接的な影響を与える。完全装備のマシンを使用することにより、ガラス1枚あたりの製造コストを少なくとも80%削減することができる(図6)。

材料科学と装置開発に関するそれぞれこの専門知識を組み合わせることにより、ショット社と3Dマイクロマック社は、ARガラスに用いられる高屈折率ガラスの切断で、高強度と高スループットを達成する方法について、大きく理解を深めることができた。まず、切断サンプルの各面の強度の特性値を予測するためのモデルを生成した。このモデルにより、最適なレーザ源とレーザパラメータを適用して、安定した量産対応のレーザプロセスを開発することが可能となり、ガラスの強度をこれまでよりも格段に高く、また、ガラスの両面で同一にすることができる。このモデルを使用することにより、対象用途の特定の強度要件に合わせてプロセスを調整することも可能である。

続いて、実験室から量産までのスループットに対応する、モジュール式の

スケラブルなコンセプト機を示した。このコンセプトのモジュール性を生かして、安定した量産対応のプロセスが既に、実験室レベルの装置として完全に実装されている。また、このモジュール式のコンセプトに基づき、さらに多くのモジュールを現場で追加することによってスループットを上げることが可能であるため、量産対応のシステムを別に購入する場合に伴う高額な資本コストを回避することができる。

参考文献

- (1) J. Herrmann, Fraktographie, TSA-Z Standard operating Procedure AAW_ZL_P-002-01 (Nov. 8, 2017).
- (2) G. D. Quinn, Fractography of Ceramics and Glasses, NIST Special Publication 960-16e2(2016).

著者紹介

ルネ・リーバース(René Liebers)は、独3Dマイクロマック社(3D-Micromac AG)のビジネス開発マネージャー、マンディ・ゲブハルト(Mandy Gebhardt)は、同社マーケティングおよび広報担当マネージャー、ファビアン・ワグナー(Fabian Wagner)は、独ショット社(SCHOTT AG)のシニアプロジェクトマネージャー。e-mail:liebers@3d-micromac.com URL:https://3d-micromac.com と www.schott.com