

平成29年度 中小企業経営支援等対策費補助金

(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「極短パルスレーザーとめっきによるパワー半導体ガラス基板のマスクレス配線工法開発」

成果報告書

平成30年3月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人岡山県産業振興財団

目 次

第 1 章 研究開発の概要

- 1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - (1) 研究開発の背景
 - (2) 研究の目的及び目標
 - (3) 研究の概要
 - (4) 実施内容
- 2 研究体制
 - (1) 実施体制
 - (2) 研究開発スケジュール
- 3 成果概要
 - (1) ガラス基板の信頼性確保
 - (2) 高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化
- 4 当該研究開発の連絡窓口

第 2 章 本論

- 1 ガラス基板の信頼性確保
 - 1-1 温度サイクル試験での信頼性向上
 - 1-2 高電圧・高電流パワーデバイスに対応する金属配線の品質向上
- 2 高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化
 - 2-1 高出力極短パルスレーザーによる表面粗化及び TH 形成条件の最適化
 - 2-2 高出力極短パルスレーザーによる配線除去及びスクライブ形成条件の最適化

第 3 章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

パワー半導体デバイスは、太陽光発電、エアコンなど家電製品のインバータ、高効率な高速走行を実現している新幹線などの電鉄車両、低燃費でCO₂排出量の少ないハイブリッド車・電気自動車・燃料電池車などの次世代自動車等、直流⇄交流変換や大型モーター制御等において、中心的な役割を担っている。近年、省エネや地球環境保護の観点から、省エネの核となるパワーエレクトロニクスへの重要性が益々高まっており、市場は急拡大している（2020年度：3.5兆円以上）。また、従来のSiに比べ電力損失が格段に低いSiC（Silicon Carbide）やGaN（Gallium Nitride）は、グローバル競争が激化する半導体においても日本が高い競争力を有しており、更に、適用範囲が広くさまざまな産業において成長の鍵となるものであることから、省エネルギー技術の国際的牽引、我が国の産業競争力強化の観点から、NEDOを中心に産学官が連携し、強力な取組がなされている。当社の川下企業においても先行的な開発を進めており、当社に対しては、パワーエレクトロニクス関連部材に対する強いコスト低減の要望がある。

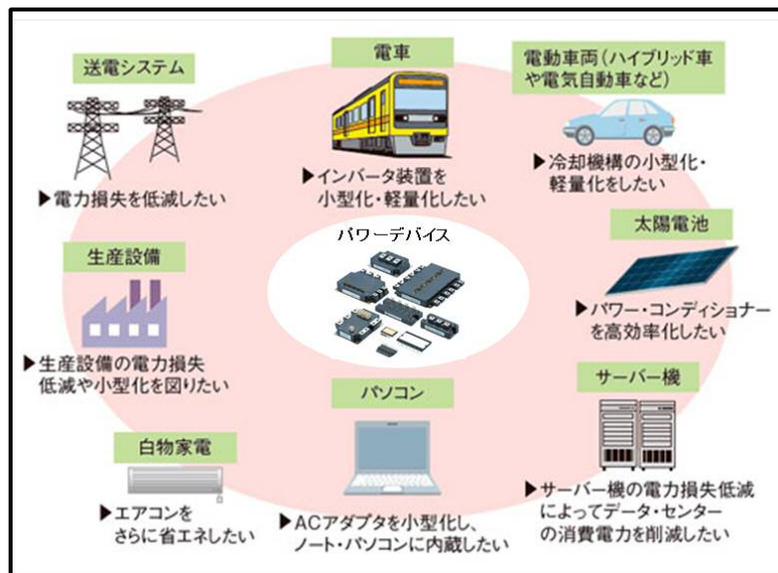


図1 パワーエレクトロニクスの市場

このようなパワー半導体は、複数のチップを用いて回路を構成し、パワーモジュールとして各機器に搭載されている。図2左に現在のパワー半導体の主流であるSiベースのGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を組み込んだモジュール（ゲル封止型）の断面構造を示す。パワーモジュールは、高電圧・大電流を流すため、チップ上で熱が発生する。

Siデバイスは、動作温度の限界が175°C近辺であり、チップ上で発生した熱を効率的に逃がすため、放熱板上に絶縁基板とパワーデバイスを接合した構造となっており、更にヒートシンクにより冷却を行っている。また、モジュール内部には、シリコンゲルが充填され、外部環境から保護する構造をとっている。

このような中、図2右に示すように、各社はIGBTの電流密度向上を進めており、高温化がますます進んで行く。さらに、高効率化（低損失化）に向け検討を進めているSiCやGaNなどの次世代パワーデバイスは低損失という特徴に加え、高電圧・高周波・高温動作が可能であるため、従来よりもモジュールの小型化が可能となる。しかし、チップ動作温度

は200°C以上となり、周辺部材にも従来以上の高耐熱化・高放熱性が求められている。

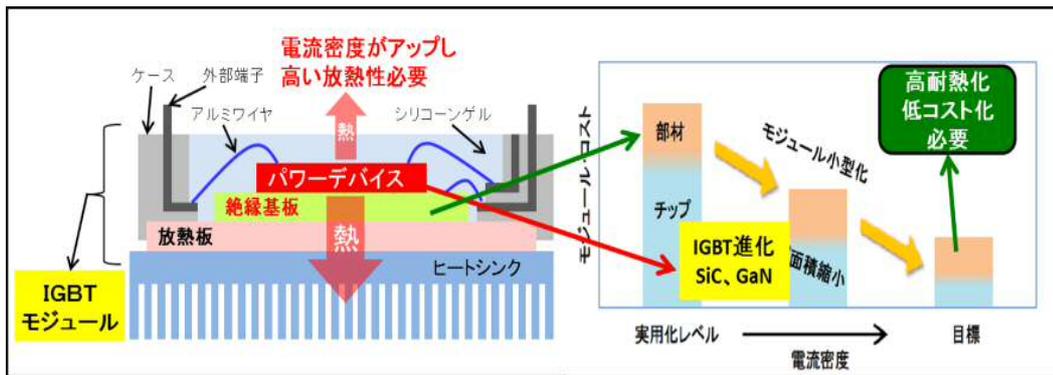


図2 パワーモジュールと今後の進化

また、パワーデバイスのコストは、チップ面積縮小により低減が見込まれるが、高耐熱化が必要な周辺部材のコスト低減は、従来技術の延長では困難な状況であり、新たな技術の創出による低コスト化が市場から強く要望されている状況である。本事業では、このような市場要望に応える、絶縁基板の革新的なコスト低減を実現する。

通常のLSI、トランジスタの場合、これらの素子を実装する絶縁基板にはガラスエポキシ樹脂基板等が用いられている。しかし、パワー半導体を実装するモジュールは、高電圧・高電流下で使用されるため、高絶縁性の確保に加え、耐熱性・熱伝導率・機械的特性（強度・破壊靱性）が必要であり、基板材料として高価なセラミックス（アルミナ、窒化アルミニウム、窒化珪素など）が用いられている。また、デバイス実装のため、セラミックス上にCuを共晶反応によって直接接合するDCB基板（Direct Copper Bond）が用いられており、更に、回路形成には図3に示すように、レジスト塗布後、マスクを用いて露光、現像、化学エッチング、レジスト除去と多くの工程が必要なうえ、除去するレジストや、エッチングされたCuが廃液として排出される。

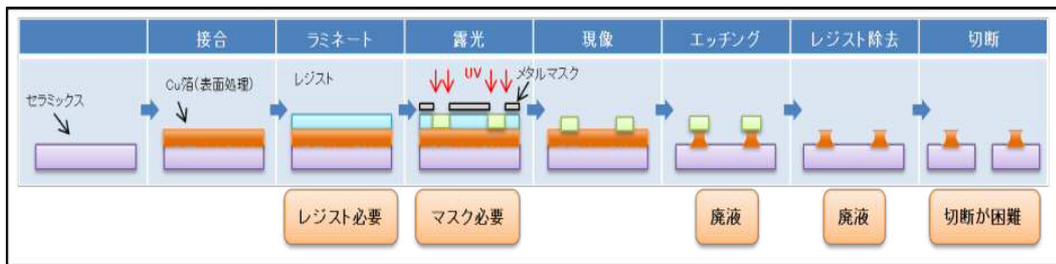


図3 セラミック基板製造方法

このように、セラミックス基板は、材料コストが高く、加工性も劣るためプロセスコストも高い。さらに、基板はパワーモジュールコストの 50%近くを占めており、パワーモジュール低価格化をはかる上で、大きな足枷となっている。そのため、現在、それらのセラミックスに代わる絶縁基板として、より安価で加工しやすいガラス基板が提案されており、世界中で研究開発が進められている。

ガラスはセラミックスに比べ安価な材料で比較的加工性も良好であり、パワーモジュール基板で必要な高い絶縁性・耐熱性を有しており、Cu配線との密着性で重要な線熱膨張係数についても、ガラスの選定により調整が可能である。また、ディスプレイ用途で使用される数m角、厚み0.7mmガラスで明らかのように生産性に優れ、スマートフォン用の強化ガラス、100μm以下の超薄基板等は、国内企業が高い優位性を有し、活発な開発が行われている。このように、ガラス基板自体は、パワーモジュール基板に必要な性能を有しており、川下企業からは、パワーモジュール基板のガラス化を要望されている。

一方、パワーモジュール基板には高い放熱性が必要であるがその絶縁材料であるガラスは、セラミックスに比べ熱伝導率が低いという課題を有している。

そのため、ガラスに貫通穴となるTH(スルーホール)を形成し、TH内に導電層を形成することで、発生した熱をガラス基板の裏面に逃がす構成が必要である。更に、高電圧・高電流下で使用されるため、基板上配線は低抵抗化が必要であり、放熱性の確保から、配線厚膜化による熱伝導率向上が必要である。

(2) 研究の目的及び目標

マスクを用いることなく、有害物質を排出しない、極短パルスレーザとめっきのみで直接ガラス上へ配線形成可能な技術基盤を核に、品質の向上で示された「経年劣化に対する予測手法の確立と向上」により、パワーデバイスで重要な温度サイクルにおける信頼性を確立し、更には、レーザ、めっき工程の最適化により、パワーモジュール用基板のコストを半減以下にすることを実現することを目的とする。

本手法によるガラス基板の製造工程図を図4に示す。

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
表面粗化/表面 (レーザ)	表面粗化/裏面 TH形成 (レーザ)	シード層形成/両面 (無電解Cuめっき)	コンフォーマル めっき/両面 (電解Cu)	配線除去/表面 (レーザ)	配線除去/裏面 スクライプ形成 (レーザ)	仕上げ/両面 (無電解Ni-Auめっき)

図4 ガラス基板の製造工程

1. ガラス基板の信頼性確保

川下企業より、温度サイクル特性として、試験後クラックの発生や試験前後も従来基板と同程度の密着強度を維持する以下の内容についての要望がある。また、金属配線については、チップとの接合信頼性確保のため、接合部のCuめっき厚のバラツキの抑制、さらに熱伝導および電気伝導の視点から以下の要望を頂いており、それらを満足する取組を推進する。

1-1 温度サイクル試験での信頼性向上

1-2 高電圧・高電流パワーデバイスに対応する金属配線の品質向上

2. 高出力極短パルスレーザによる加工条件の最適化

目標とするガラス基板製造プロセスコストを実現するためには、レーザ加工時間の短縮化が不可欠となる。そのため、高出力化による走査速度向上と走査方法等の改善を目指し、信頼性の確保をしつつ、目標加工コストを達成させるための加工時間の短縮化に向けた取組を推進する。また、配線除去およびスクライプ形成についても現在、加工時間が長く、表面粗化と同様に信頼性の確保をしつつ、目標時間内での加工を達成させる取組を推進する。

2-1 高出力極短パルスレーザによる表面粗化及びTH形成条件の最適化

2-2 高出力極短パルスレーザによる配線除去及びスクライプ形成条件の最適化

(3) 研究の概要

ガラス基板上へ導体を形成する場合、極めて平滑な表面性状のため、通常は無電解めっき工程では、十分な密着性を確保できない。そのため、密着性を高めるシード層形成が必要であり、図5に示すように、まず、スパッタリングでTi(Titanium)やTiW(Titanium Tungsten)等の密着層を形成後、更にCuシード層を形成する方法が検討されている。しかし、装置が高価なうえ、ガラス孔内に均一にシード層を形成することが困難である。また

パワーモジュールでは、これまで述べて来たように基板回路上の配線を厚くする必要があるが、スパッタリングでは極めてタクトが長くなるという課題がある。さらに回路形成においても、レジスト塗布後、マスクを用いて露光、現像、レジスト除去、エッチングと多くの工程が必要であり、プロセスコストが高価となる。

そこで当社は、プロセスコスト低減を実現する、マスクやレジストを使用しない、極短パルスレーザーによるガラス上への表面改質、めっきによるガラスへの直接回路形成方法の取り組みを進めている。レーザーを極短パルス化することで、照射部周辺への熱影響を抑制し、ガラスに対する熱影響の残留（溶融再付着、熱ひずみ、ひび割れ等）を大幅に低減することが可能である。更に、ガラスを透過する波長のレーザーにおいても、極短パルス化により非線形吸収（多光子吸収）を誘導することで加工を可能とし、ガラスに対する微細、且つ高精度の加工を実現している。また本方式は、工程の大幅な削減に加え、ガラスとCu配線の高い密着性と高膜厚化が可能であり、更にレジストやCuの廃液を発生させない、革新的なガラス基板の製造プロセスである。

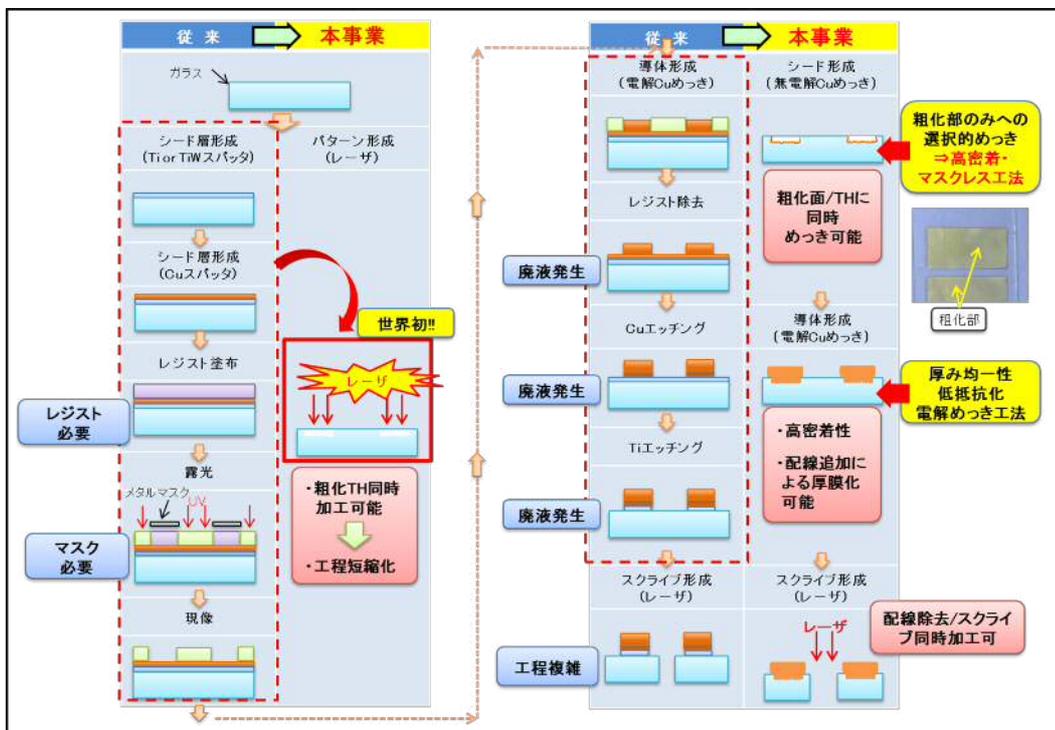


図5 ガラス基板の作製プロセス

(4) 実施内容

1. ガラス基板の信頼性確保

1-1 温度サイクル試験での信頼性向上

温度サイクル試験後に発生するガラスのクラックは、ガラスとCuめっき皮膜の線熱膨張係数の差により生じた応力による可能性と、レーザーによる基材へのダメージによる可能性が推測される。そこで、レーザー加工条件の最適化や皮膜応力の調整、応力緩和により信頼性を向上するため、以下の項目を検討し、得られた最適条件にて作製したガラス基板において温度サイクル試験を行ない、クラックの有無および密着強度を確認する。

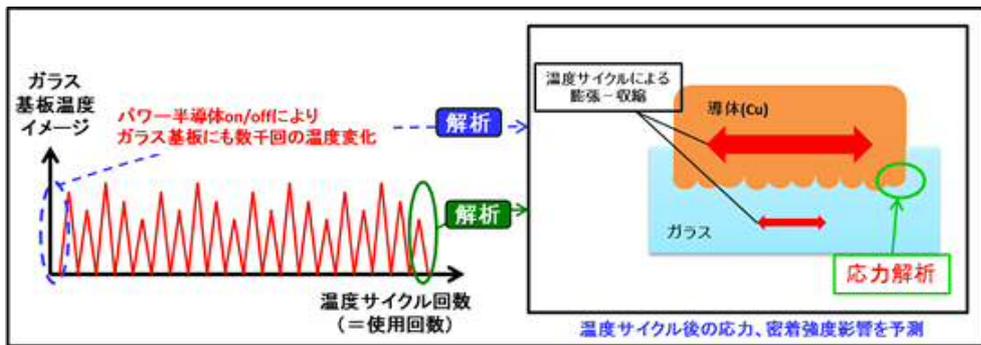


図6 温度サイクルによる応力への影響検討

1-1-1 レーザ加工条件と密着性および温度サイクル試験との相関確認

これまでの研究で、めっき皮膜とガラス基板の初期密着性に関して、表面粗度が影響していることを確認している。つまり、表面粗度が大きいほど、めっき皮膜とガラス基板の初期密着力は強くなる。それに対し、耐久性(温度サイクル試験後の密着力)は、ある程度まで表面粗度が大きくなると、急激に低下する。これは、レーザ加工によるガラス損傷の影響であると推定できる。ここでは、図7に示すように、密着力と耐久性の両方が確保出来る表面粗度を得るためのレーザ加工条件の最適化を行う。

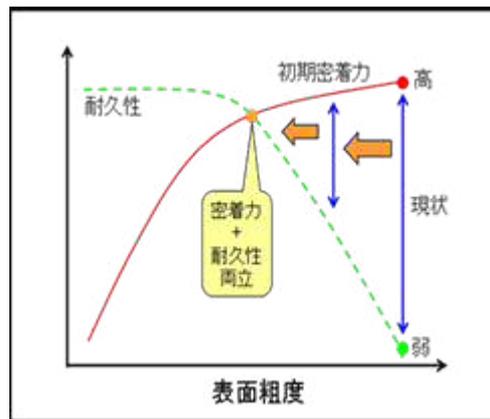


図7 表面粗度と密着性及び耐久性の関係

1-1-2 バッファ層による熱応力低減効果の検討

ガラスとCuめっきの間に、バッファ層として線膨張係数がそれらの中間にある材料を配置し、応力低減の効果を検討する。

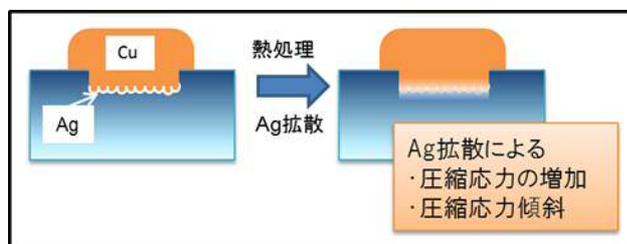


図8 バッファ層イメージ図

1-1-3 加工形状の最適化による熱応力低減効果の検討

ガラスへのレーザ加工形状の検討をする上で加工応力分布を可変し、温度サイクル試験へ与える影響について調査する。

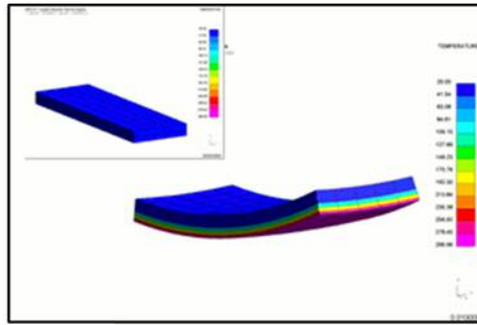


図9 熱応力解析イメージ図

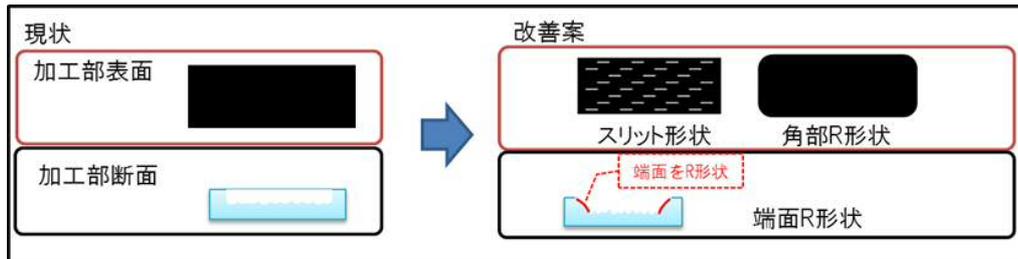


図10 応力緩和加工方法イメージ

1-1-4 Cuめっきの残留応力の温度依存性

温度サイクル試験時の温度変化に伴う Cu の残留応力の温度依存性について調査する。

1-1-5 めっき皮膜特性が温度サイクル試験に与える影響検討

Cu めっき皮膜が持つ残留応力が温度サイクル試験へ影響を与える可能性が考えられる。電解 Cu めっき浴中の有機添加剤種や濃度を変え、めっき皮膜がもつ応力を変えることで温度サイクル試験後の割れに影響するか調査する。

1-1-6 熱処理および無電解 Ni/Au めっきの検討

熱処理することで改善傾向がみられるか試験をおこなう。また、熱処理工程の順序および電解 Cu めっき後の無電解 Ni/Au めっきの有無による温度サイクル試験への影響についても試験を実施する。

1-1-7 無電解 Ni めっきによるガラス基板の信頼性向上のメカニズム解明

ガラス基板上へ Cu めっきのみを施したサンプルと Cu めっき後に無電解 Ni/Au めっきまで施したサンプルでは、後者の方が耐温度サイクル特性が向上した。これは、Cu めっきにおいて発生した応力が無電解 Ni めっきによって緩和されたと考えられる。そのため、シミュレーションにより両者の応力分布の解析を行い、無電解 Ni めっきによる応力緩和の効果を明確にする。

1-1-8 熱処理によるガラス基板の信頼性向上のメカニズム解明

熱処理により耐温度サイクル特性が向上するメカニズムを明らかにする。

1-1-9 スルーホール周りの熱応力の解析

ガラス基板にスルーホールを形成し、その後 Cu めっきを施した際、スルーホール周

辺にかかる応力を調査するとともにスルーホール形状（テーパの有無）が応力に及ぼす影響も明らかにする。

1-1-10 めっき角部の熱応力

現在までの研究において、めっき角部に生じるガラスの割れ方には図 11 に示すように 2 種類のパターンが存在することが分かっている。本節では、数値解析によりその原因を検討する。

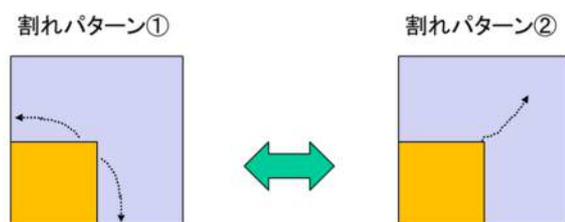


図 11 割れパターンイメージ

1-1-11 ヒートサイクル試験における信頼性の確認

上記検討により得られた成果をもとにガラス基板を作製し、ヒートサイクル試験およびめっき皮膜の密着強度測定を実施する。このとき、レーザ加工には 2-1-1 で導入した高出力のレーザ加工機を使用し、低出力の加工機を用いて作製したガラス基板の評価結果との比較も行う。

1-2 高電圧・高電流パワーデバイスに対応する金属配線の品質向上

*金属配線の低抵抗化を実現する電解 Cu めっき液の選定

厚い Cu めっき皮膜を高い生産性で実現するためには電解 Cu めっきが必要だが、得られた皮膜はめっき液中に含有される有機添加剤が一部取り込まれ、本来の Cu としての特性を低下させる可能性がある。そのため低電気抵抗のめっき皮膜が形成可能な電解 Cu めっき液組成やめっき条件の最適化を推進する。

*金属配線の高精度めっき厚みを実現する電解 Cu めっきプロセスの検討

電解 Cu めっきは、無電解 Cu めっきに比べ、めっき皮膜の厚みが不均一になりやすい。不均一な導体厚みは、チップとの接合信頼性の悪化を招くため、極めて均一なめっき厚が要求される。そのため、めっき方法を検討し、生産性が高く、均一なめっき厚となる電解 Cu めっきプロセスを構築する。

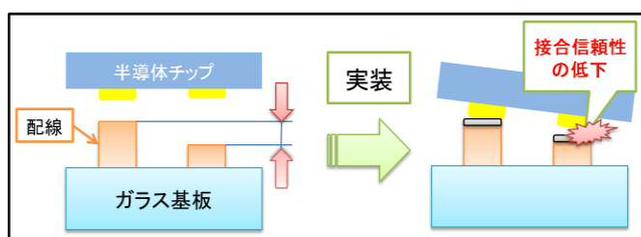


図 12 ガラス基板と半導体チップの接合

1-2-1 Cu めっき皮膜の品質調査

各種電解 Cu めっき液を用いて Cu めっき皮膜を形成し、本件の金属配線の要求仕様に合致するめっき液を選定する。

1-2-2 Cuめっき皮膜の均一電着性の検討

1-2-1において選定しためっき液を用いて評価用パターンに電解Cuめっきを行い、めっき条件の最適化により均一な膜厚分布となる電解Cuめっきプロセスを構築する。

2. 高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化

2-1 高出力極短パルスレーザーによる表面粗化及びTH形成条件の最適化

目標とするガラス基板製造プロセスコストを実現するためには、今後、レーザー加工時間の短縮化が最大の課題となる。そのために、次の3項目を検討する。

*レーザーの高出力化による生産性向上

加工速度はエネルギー密度に比例するため、高出力のレーザー加工機を導入し、走査速度の向上を行う。また、高出力化により、ビーム径の拡大、繰り返し周波数の増加を検討し、生産性に影響するピッチ間隔（送り量）拡大、ショット数の削減検討により、レーザー加工時間短縮を実現する。

*取り数の最適化による生産性向上

量産でのコスト低減には、基板を一枚一枚作製するのではなく、大判ガラスシート上に多数の基板を作製する必要がある。そのためレーザーの走査順および走査範囲、ガラスの運搬および脱着、等を考慮し、大判ガラスからの取り数の最適化を行い、量産化を踏まえたレーザー加工時間の短縮化をはかる。

*レーザー走査方法の最適化による加工の高速化

○表面粗化

レーザーで描画する際、1ライン走査した後、切返しを行い、次のラインへ移動し、パターンを形成している。切返し時、レーザー光を回転させる工程、レーザー照射位置を合わせる工程が必要となり、時間のロスとなるため、高性能なガルバノミラーを導入し、広い加工範囲においても、高精度な表面粗度を管理できる加工方法と、切返しの少ない走査方法の検討を行う。また、回路の配線部と非配線部あるいは配線部内での要求性能に応じて、適応的に加工速度を変化させることにより、加工時間の短縮化を推進する。

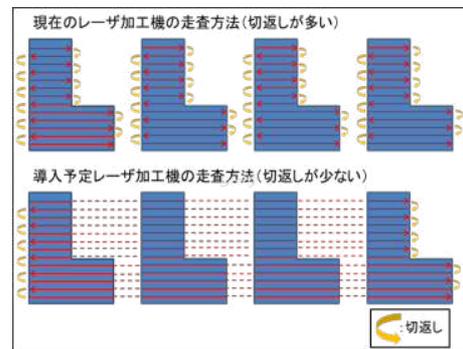


図 13 表面粗化のレーザー走査

○TH（スルーホール）形成

現在、図14左に示すように、円を全面走査（ハッチング加工）することでTHを形成しており、走査に時間を要している。そのため、連続加工に必要なガルバノミラーの等速性を担保する図14右に示すワブリング加工（レーザー光を細かく円状にふらしながらの加工）による部分ハッチング検討を推進し、加工範囲の短縮化をはかる。

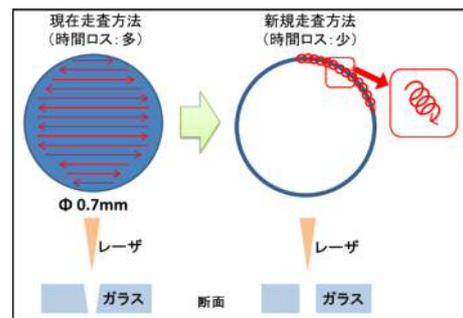


図 14 TH形成のレーザー走査方法

図 15 に示すように、レーザの高出力化、取り数の最適化、レーザ走査方法最適化の開発により、目標とするガラス基板製造プロセスコストを実現できると試算している。特に、レーザの高出力化および TH 形成については、試算以上に改善の可能性を有している。

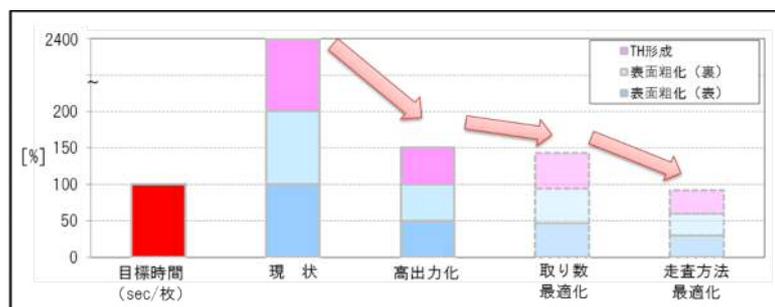


図 15 レーザ加工時間の短縮化へのプロセス

2-1-1 発振器の高出力化による加工時間の短縮

高出力のレーザ加工機を導入し、走査速度、ビーム径、繰り返し周波数、ピッチ間隔（送り量）の最適化により、加工時間の短縮化をはかる。

2-1-2 レーザビーム径の拡大による加工時間の短縮

レーザビーム径を拡大することで、走査速度の上昇およびピッチ間隔の増大が可能となる。これにより、加工時間の短縮化をはかる。

2-1-3 レーザ加工方法の最適化による TH 形成時間の短縮

TH 形成時のレーザ加工方法の検討により、TH 形成に要する加工時間の短縮化をはかる。

2-2 高出力極短パルスレーザによる配線除去及びスクライブ形成条件の最適化

*導通配線除去条件の最適化

電解 Cu めっきでガラス上に回路を形成するためには、全てのパターンの導通をとる必要がある。このため、図 16 に示すように、各パターンに導通配線を追加し、電解 Cu めっき後、追加した配線を除去する必要がある。現在までに、表面粗化および TH 形成と同様に、極短パルスレーザを用いて、Cu めっきを選択的に除去できることを確認している。

今回、レーザ走査方法および走査順の最適化により、加工の高速化を行う。

また、Cu めっきは、反射は大きいものの、ガラスより高い吸収率を示す。そのため、現在のレーザ加工機よりも、加工速度向上およびコスト低減に優れた、高波長あるいは長パルス幅のレーザで加工できる可能性を有している。今回、配線除去に適したレーザ加工機の選定・加工検討を推進し、電解 Cu めっきに必要な導通配線の除去を含めた加工の最適化を実現する。また、除去幅等は回路の電気的特性に影響があるため、川下企業と協議を進めながら、高電流高電圧に対応する除去方法や除去幅の検討を推進する。

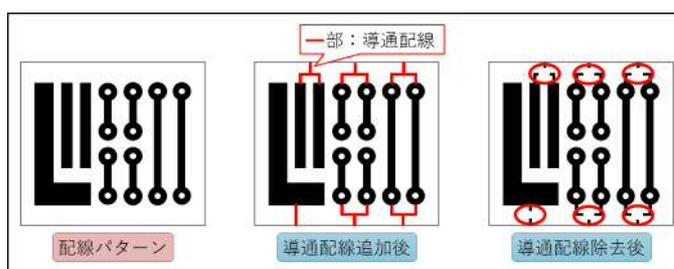


図 16 導通配線イメージ図

* スクライブ形成条件の最適化

大判ガラスシート上に多数の基板を作製する場合、回路形成後、基板を切り離す工程が必要となり、割断のためのスクライブ(細い溝)を形成する。ガラスの割断工程は、スクライブ形状に起因する不良の発生率が高く、スクライブ形状が重要な因子である。そのため、スクライブ形状の最適化を行う。

また、スクライブ形成についてもレーザ走査方法および加工順序の最適化を行うとともに、スクライブに適したレーザ加工機の選定により、加工の高速化を目指す。さらに近年、パルス幅の長いレーザを用いて、ガラスの割断が行われており、この技術の適用も踏まえ検討を行い、加工速度の飛躍的な向上を実現する。

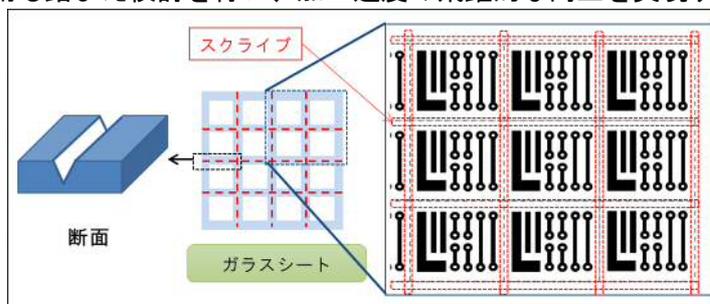


図 17 スクライブの形成

2-2-1 配線除去条件の最適化

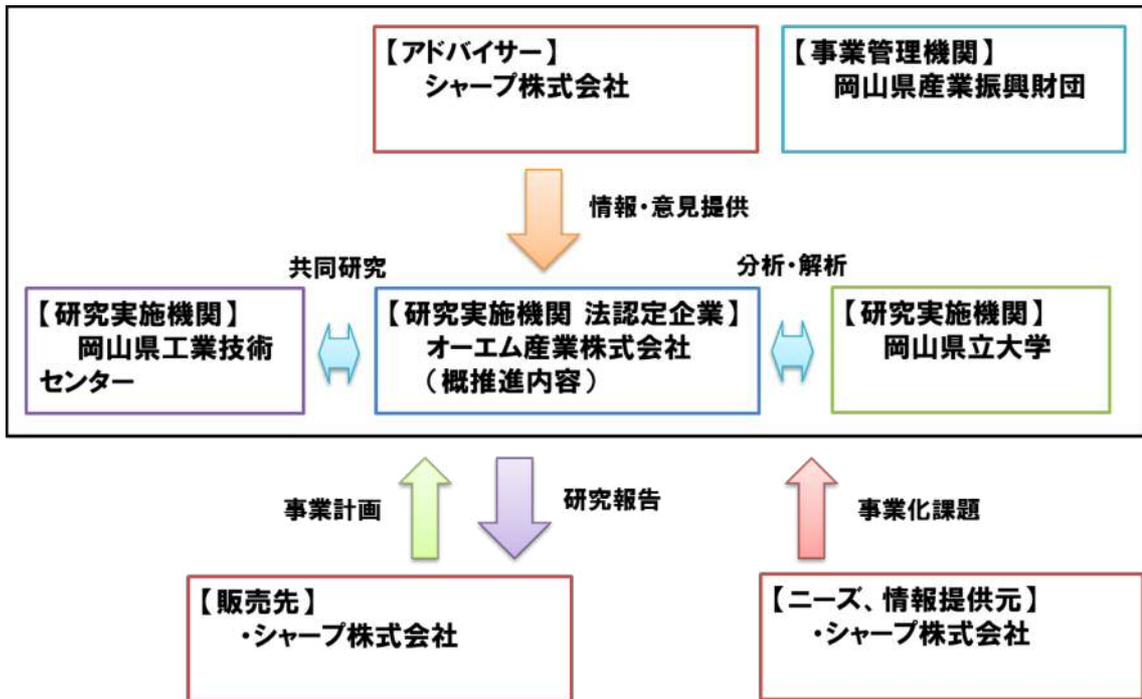
ガラスにダメージを与えることなく Cu めっき皮膜のみを選択的に除去するために適したレーザ加工機の選定をし、レーザと化学エッチングの組み合わせによる金属配線除去プロセスを確立する。

2-2-2 スクライブ形成条件の最適化

生産性向上のため、大判ガラスにめっきを行った後にスクライブ形成して個片化する必要がある。ここでは、スクライブの深さおよび形状と割断時の破壊強度の関係を明確にし、ガラス基板を損傷することなく個片化する方法を検討する。

2 研究体制

(1) 実施体制



(2) 研究開発スケジュール

【番号】実施内容	実施時期											
	初年度				第二年度				第三年度			
	4月 ～ 6月	7月 ～ 9月	10月 ～ 12月	1月 ～ 3月	4月 ～ 6月	7月 ～ 9月	10月 ～ 12月	1月 ～ 3月	4月 ～ 6月	7月 ～ 9月	10月 ～ 12月	1月 ～ 3月
研究開発等の年度目標 【1】ガラス基板の信頼性確保	温度サイクル試験 100cycle 後における信頼性確保 200cycleの試験完了および結果の確認				温度サイクル試験 1,000cycle における信頼性確保 配線品質				配線品質			
【1-1】温度サイクル試験での信頼性向上	→											
【1-2】高電圧・高電流パワーデバイスに対応する金属配線の品質向上	→											
研究開発等の年度目標 【2】高出力極短パルスレーザによる加工条件の最適化	新規導入したレーザ装置におけるレーザ加工性能の確立				レーザ加工時間短縮				レーザ加工時間短縮			
【2-1】高出力極短パルスレーザによる表面粗化及び TH 形成条件の最適化	→											
【2-2】高出力極短パルスレーザによる配線除去及びスクライブ形成条件の最適化	→											
【3】研究全体の統括、プロジェクト管理運営	課題解決に向け、プロジェクトメンバーで都度打ち合わせを実施。				プロジェクトメンバーだけでなく、必要に応じて外部機関から助言をもらい、プロジェクトを推進				プロジェクトメンバーによる効果的な会議により、遅延なく本プロジェクトを完遂			
推進委員会の開催 報告書の作成			●	●	●		●	●	●		●	●

3 成果概要

(1) ガラス基板の信頼性確保

【1-1】 温度サイクル試験での信頼性向上

温度サイクル試験における信頼性向上のため、レーザ加工条件の最適化や皮膜応力の調整、応力緩和検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) レーザ加工密度を低下することで温度サイクル試験での信頼性は向上する。
- 2) バッファ層による応力低減、レーザ加工形状の最適化、めっき皮膜の持つ応力については大きな影響はない。
- 3) 温度サイクル試験での信頼性向上に最も高い効果が得られるのは熱処理である。
- 4) 熱処理をすることで、ガラス表面の水酸基が減少し、ガラスの破壊強度が増加する。
- 5) ガラス上に Cu めっきをした場合と Cu めっき/無電解 Ni めっき/無電解 Au めっきをした場合では、後者の方が温度サイクル試験での信頼性が高い。
- 6) めっき角部に生じるガラスの割れ方には 2 種類のパターンが存在し、ガラスとめっき皮膜の密着性の大小に起因する。
- 7) 熱応力解析により、TH の端部近傍に約 120MPa の最大応力が観察されるが、TH 側壁の形状による差はみられない。

【1-2】 高電圧・高電流パワーデバイスに対する金属配線の品質向上

金属配線の品質確認を行い、以下の結果を得た。

- 1) チップ搭載箇所における Cu めっき皮膜の均一電着性は±5%である。
- 2) Cu めっき皮膜の電気抵抗率は目標値以下である。

(2) 高出力極短パルスレーザによる加工条件の最適化

【2-1】 高出力極短パルスレーザによる表面粗化及び TH 形成条件の最適化

高出力のレーザ加工機の導入およびレーザ加工条件の検討により加工時間の短縮化を行い、以下の結果を得た。

- 1) レーザ発振器の高出力化および加工条件の最適化により、評価用パターンの表面粗化時間を 1/7 倍短縮。
- 2) レーザ発振器の高出力化および加工条件の最適化により、評価用パターンの TH 形成時間を 1/19 倍短縮。

【2-2】 高出力極短パルスレーザによる配線除去及びスクライプ形成条件の最適化

配線除去に最適なレーザ発振器の選定および配線除去プロセスの検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 配線除去方法の最適化により、配線除去箇所の元素分析で金属成分の検出はなく、リーク電流は検出限界以下である。

また、スクライプ形成については、大判ガラスの個片化を想定した検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 化学強化層よりも深いスクライプを形成することで容易に割断することが可能。
- 2) スクライプ形状を変えても破壊強度に大きな変化はない。

4 当該研究開発の連絡窓口

管理法人：公益財団法人岡山県産業振興財団

所在地：〒701-1221 岡山県岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山 3 F

担当者：ものづくり支援部 次長 入江 栄治

連絡先：TEL：086-286-9651 FAX：086-286-9676

E-mail：bay@optic.or.jp

研究機関：オーエム産業株式会社

所在地：700-0971 岡山県岡山市北区野田 3 丁目 18 番 48 号

担当者：技術部 西村 宜幸

連絡先：086-241-3201

E-mail：nishi@oms.co.jp

1 ガラス基板の信頼性確保

本研究では、30mm×70mm×t0.55mm のガラスを用い、10mm×25mm のエリアを3箇所レーザー照射して粗化し、レーザーで粗化した箇所のみをめっきを析出させたものを作製し、評価を進めた。レーザーによる粗化からめっきまでの工程は図19に示すようにレーザー加工したガラスに前処理を行った後、無電解Cuめっき、電解Cuめっき、無電解Niめっきおよび無電解Auめっきを施し、レーザー照射箇所のみを選択的にめっきを析出させた。

また温度サイクル試験後は、サンプル裏面を光学顕微鏡を用いて20倍の倍率で割れ発生の有無について外観を確認した。その判定方法として図20のようにクラックや割れが発生しているものを「割れ」とし、発生していないものを良品とした。

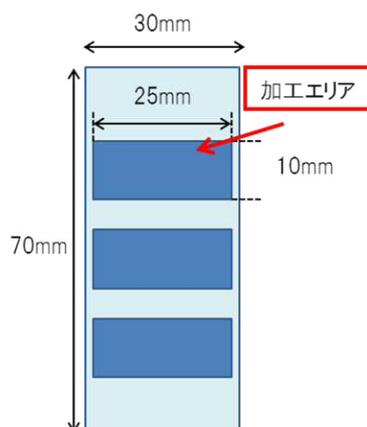


図18 ガラスサイズおよび加工エリア

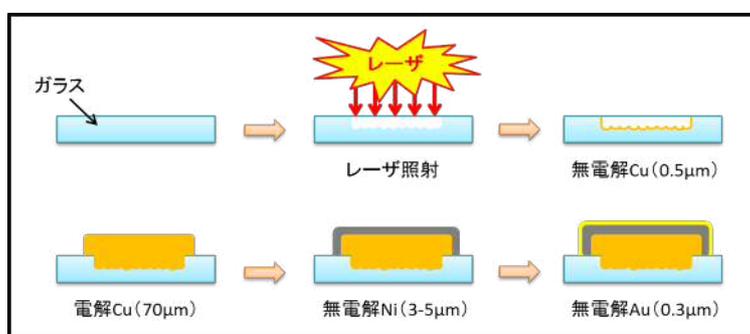


図19 本研究の工程

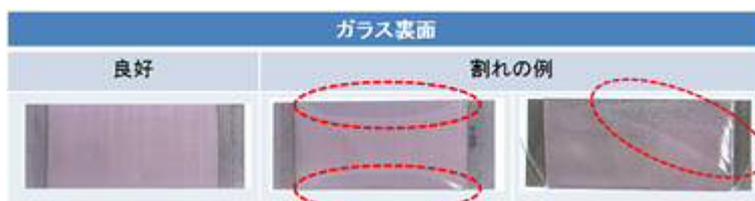


図20 割れの良否判定方法

1-1 温度サイクル試験での信頼性向上

温度サイクル試験後に発生するガラスのクラックは、ガラスとCuめっき皮膜の線熱膨張係数の差により生じた応力による可能性と、レーザーによる基材へのダメージによる可能性が推測される。そこで、レーザー加工条件の最適化や皮膜応力の調整、応力緩和により信

頼性を向上するため、以下の項目を検討し、得られた最適条件にて作製したガラス基板において温度サイクル試験を行ない、クラックの有無および密着強度を確認した。

1-1-1 レーザ加工条件と密着性および温度サイクル試験との相関確認

これまでの研究で、めっき皮膜とガラス基板の初期密着性に関して、表面粗度が影響していることを確認している。表面粗度が大きいほど、めっき皮膜とガラス基板の初期密着力は強くなる。それに対し、耐久性(温度サイクル試験後の密着力)は、ある程度まで表面粗度が大きくなると、急激に低下する。これは、レーザ加工によるガラス損傷の影響であると推定できる。ここでは、密着力と耐久性の両方が確保出来る表面粗度を得るためのレーザ加工条件の最適化を行った。

本節では、低出力レーザを用いて加工条件を変えたサンプルを作製し、レーザ顕微鏡および微細形状測定機にてガラスの算術平均粗さ Ra、最大高さ Rz を測定した。基材であるガラスに与えたエネルギー量をレーザの加工密度(エネルギー密度)として下記に示す式を用いて算出し、それぞれのエネルギー密度によって表面粗度とめっき皮膜との密着性についての相関を確認した。

$$\text{加工速度(エネルギー密度)} = \frac{\text{出力} \times \text{周波数}}{\text{速度} \times \text{ピッチ}}$$

また、図 21 に示すようにめっきを施したサンプルの密着強度については JIS H 8504 に準じて測定を行った。L 形金具の母材には板厚 0.5mm の無酸素 Cu を使い、はんだ付け部の面積が 5mm×5mm になるようにして指定された形状にプレス成型したものをを用いた。またはんだ付けが可能となるように、Cu めっきを施したガラスサンプルおよび L 形金具のそれぞれに無電解 Ni めっき後、無電解 Au めっきを施した。はんだにはペースト(SnAgCu)を用い、試料上にφ8mm×0.2mm 塗布後、300℃で1分間加熱し、L 形金具とはんだ付けを行った。この試料を用いて、引っ張り試験機により、密着強度の測定を行った。

レーザ加工条件については Ra が大きくなると Rz も増加し、Ra と Rz は比例関係にあることを確認した。またエネルギー密度と Ra も比例関係であることを確認した。さらにレーザの加工条件を変えてエネルギー密度の異なるサンプルを作製し、温度サイクル試験をおこなったところ、エネルギー密度が低いほど割れは改善される傾向を示した。これはレーザ照射によってガラスへ与えたダメージが緩和されたことで改善したと考えられる。

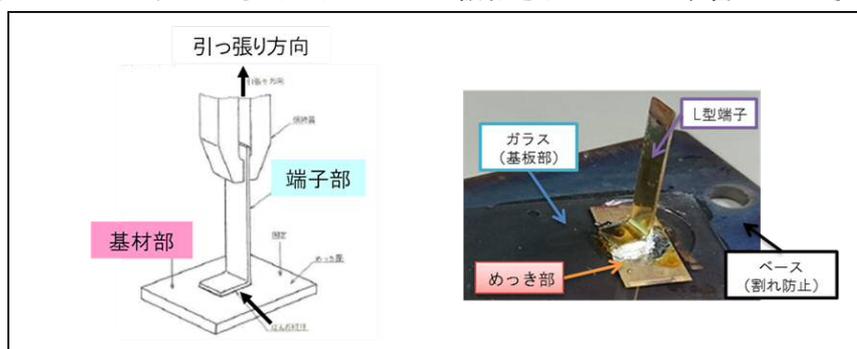


図 21 密着強度の測定

1-1-2 バッファ層による熱応力低減効果の検討

ガラスと Cu めっき皮膜の間に、バッファ層として線膨張係数がそれらの中間にある材料を配置し、応力低減の効果を検討した結果、バッファ層を無電解 Cu めっきから無電解 Ag めっきに変更しても割れは改善されなかった。

1-1-3 加工形状の最適化による熱応力低減効果の検討

ガラスへのレーザ加工形状の検討をする上で加工応力分布を可変し、温度サイクル試験へ与える影響について調査した。

○シミュレーションによる解析

まずはじめにパターンの R 形状の違い、レーザ加工深さ（パターン深さ）により応力の分布がどのように変化するかシミュレーションにより解析をおこなった。

図 22 に解析モデルの概要を示す。Cu パターン角部での応力集中の評価を目的とし、同図に示すように 1/4 モデルを採用し、 $1,000\mu\text{m} \times 1,000\mu\text{m} \times 550\mu\text{m}$ のガラス基板に深さ d の溝を付け、その溝に Cu パターンを取り付けた。角部の R は、 $0\mu\text{m}$ （四角）、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ の 3 種類とした。溝深さ d は $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ の 2 種類とした。またガラス基板と Cu パターンの接触条件はパターン剥離がない状態を想定した接着条件（接触部における相対変位がゼロ）と理想的なバッファ層の存在もしくはパターンの全面剥離を想定した接触条件（接触面に平行な相対変位は自由。ただし接触面の法線方向の相対変位はゼロ）の 2 種類とした。常温を 30°C 、高温条件を 150°C とし、全節点に対して温度上昇 $\Delta T = 120^\circ\text{C}$ を与え定常熱応力解析を実施した。解析には汎用構造解析ソフトウェア MSC MARC を用いた。また、解析に使用した物性値を表 1 にまとめる。

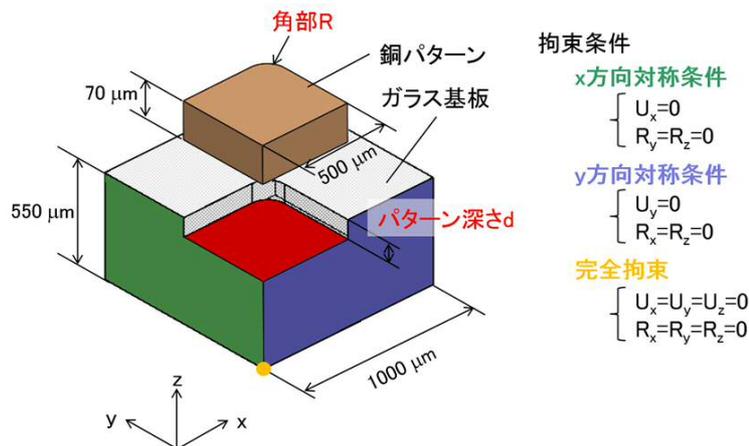


図 22 解析モデルの概要

表 1 ガラス基板と Cu パターンの物性値

	ガラス基板	銅パターン
ヤング率	64GPa	117GPa
ポアソン比	0.20	0.33
線膨張係数	9.8×10^{-6}	16.8×10^{-6}

図 23(a)～(f) は接着条件に関するガラス基板の最大主応力分布を示す。角部の最大主応力はいずれの条件についても概ね 50MPa 程度であり、 d および R の影響は小さい結果となった。なお、より詳細に観察すると溝深さ d を一定とした場合には角部の R が大きいほど最大主応力のピーク値は小さくなる傾向にある。また角部の R を一定とした場合には溝深さ d が大きい場合に最大主応力のピーク値は若干小さい。

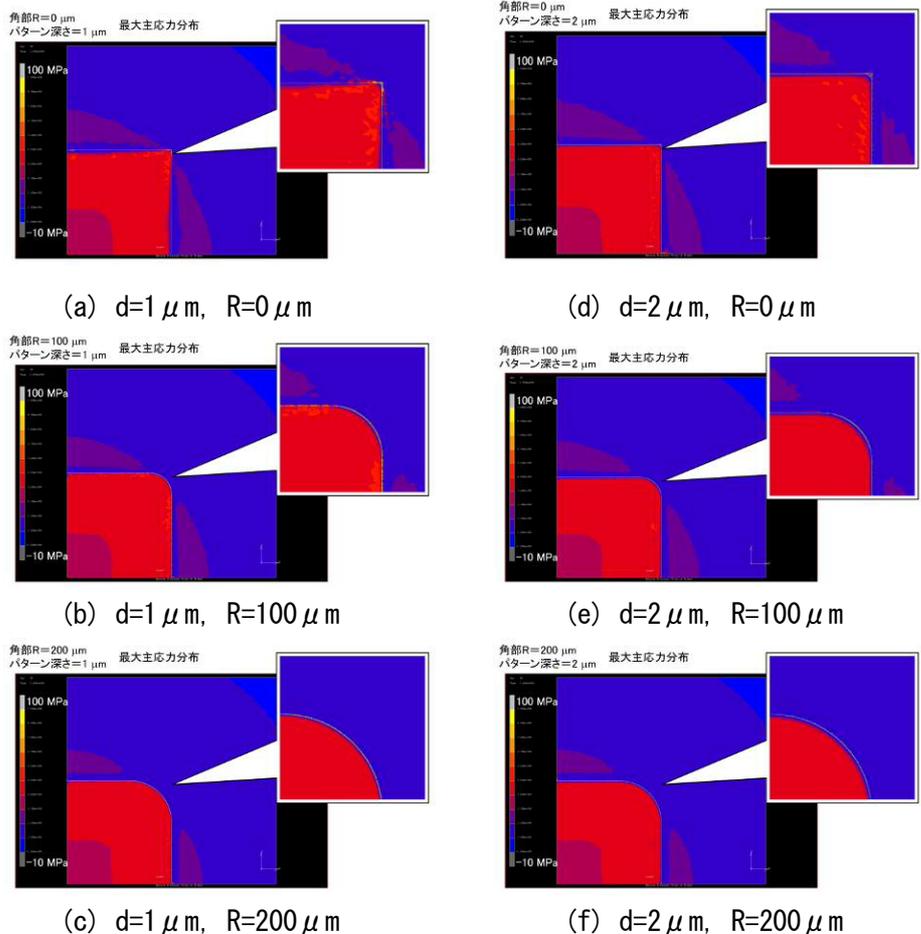
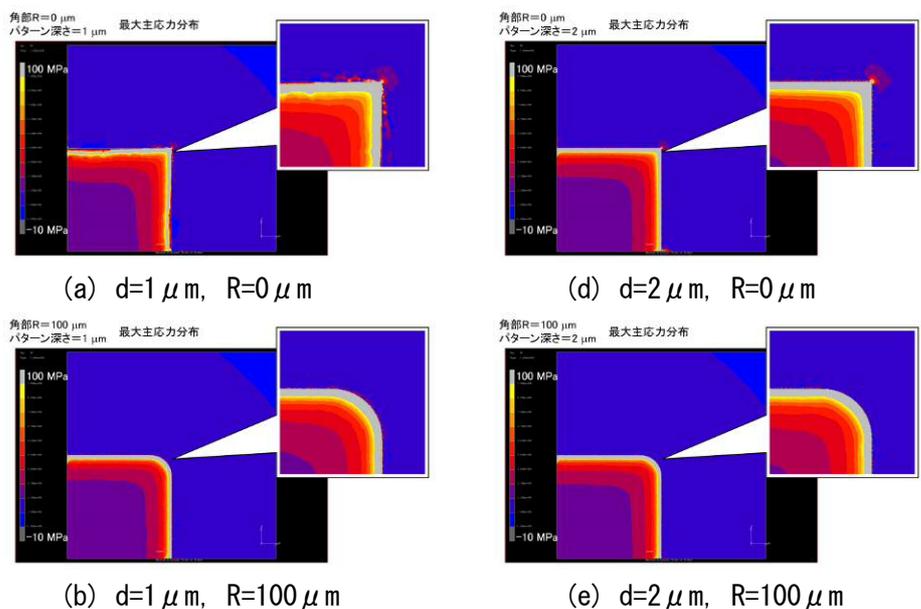


図 23 接着条件に関するガラス基板の最大主応力分布

図 24(a) ~ (f) は接触条件に関するガラス基板の最大主応力分布を示す。図 40 の接着条件の最大主応力と比べると、中央部（図の左下）は小さいが、角部ではかなり大きい。これは、接触条件ではせん断力が伝達されないため、Cu の膨張に対する抵抗力が溝側面のみを生じるためである。このことから、ガラスと Cu の中間的な線膨張係数を有するバッファ層を設ける場合、その厚さは溝深さ以上にする必要があると推測される。



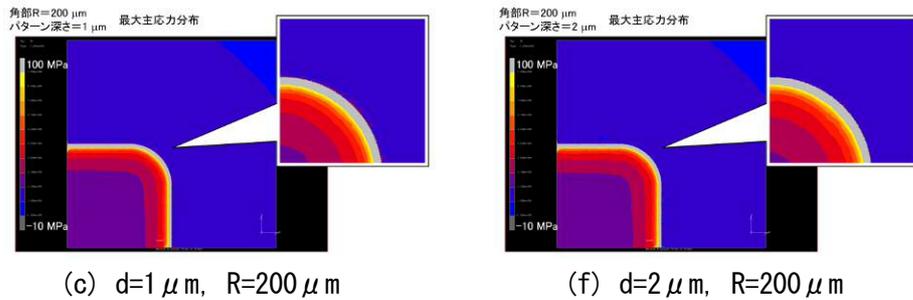


図 24 接触条件に関するガラス基板の最大主応力分布

ガラス基板上的の溝に Cu を取り付けた場合の熱応力解析を行った。主な結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 接着条件と溝深さを一定とした場合、最大主応力は角部の R が大きいほど小さくなる傾向にある。
- ・ 接着条件と角部の R を一定とした場合、最大主応力は溝深さが大きいほど小さくなる傾向にあるが $1\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ では大差がない。
- ・ 角部の R と溝深さを一定とした場合、接触条件の最大主応力は接着条件に比べて大きい。従ってバッファ層を設ける場合、その厚さを溝深さ以上にすることが望ましい。

○加工形状の検討

現状、レーザ加工は図 25 に示すように面分布は均一（連続）に、加工端部は基材に対して垂直に加工している。そこで面分布を不均一（不連続）にする、スリット形状にする、加工端部を R 形状にするなどして加工形状の最適化をはかり、面内の応力低減、角部への応力集中の緩和を検討した。レーザ加工条件については全て同じ条件である。

結果としては、いずれのパターンでも大きな改善はみられなかった。

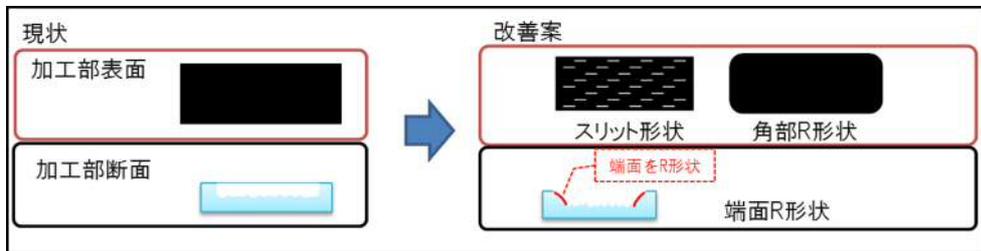


図 25 レーザ加工形状

1-1-4 Cu めっきの残留応力の温度依存性

温度サイクル試験時の Cu の残留応力の温度依存性について調査するため、各温度でのガラス基板上的の Cu めっき皮膜の残留応力を測定した結果、温度を上げるにつれて、圧縮応力が大きくなることを確認した。これは、温度上昇に伴い、Cu めっき皮膜は熱膨張により伸びるが、ガラス基板の拘束により、自然長よりも縮んでいることを示している。このことより、ガラス基板表面では、Cu めっき皮膜とは反対に、割れを促進する引張応力になっており、温度サイクル試験での割れは、温度上昇時に発生していると推測される。

また、 100°C 以上になると、残留応力の変化が小さくなること、および、熱的ヒステリシス（昇温と降温で残留応力の推移がずれる）が存在することが確認された。これらについては、金属の転位が影響していると推測される。

1-1-5 めっき皮膜特性が温度サイクル試験に与える影響検討

めっき皮膜がもつ応力を変えることで温度サイクル試験後の割れに影響するか調査した

結果、電解 Cu めっき皮膜の応力を変えても大幅な改善はみられなかった。

1-1-6 熱処理および無電解 Ni/Au めっきの検討

熱処理することで改善傾向がみられるか確認を行った。また、熱処理工程の順序および電解 Cu めっき後の無電解 Ni/Au めっきの有無による温度サイクル試験への影響についても試験を実施した。熱処理については、本試験で使用したガラスのガラス転移点以下の温度で実施した。

その結果、熱処理工程を追加すること及び電解 Cu めっき上に無電解 Ni/Au めっきを施すことで温度サイクル試験での信頼性は向上した。熱処理工程については、レーザ後またはめっき後のどちらの工程で実施しても効果が得られたことから、めっきではなくガラスの特性変化に影響していると推測される。また無電解 Ni/Au めっきの効果については、電解 Cu めっきのみの場合は Cu の酸化によるめっき皮膜特性の変化による影響、さらに Cu めっき皮膜より線熱膨張係数の小さい無電解 Ni めっき皮膜 ($11 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}/K$) を施すことで Cu めっきの皮膜の膨張を抑制し、温度サイクル試験での信頼性向上に起因していると考えられる。

さらに、温度サイクル試験 1,000cycle 後に割れが発生しなかったサンプルについて、めっき皮膜の密着強度の測定を行った。測定は、1-1-1と同様に図 21 に示す方法で、JIS H 8504 に準じて行った。結果を図 26 に示す。すべてのサンプルにおいて目標を満足する良好な結果が得られた。中でも、めっき後に熱処理（条件①）を行ったサンプルで最も高い密着強度が得られた。

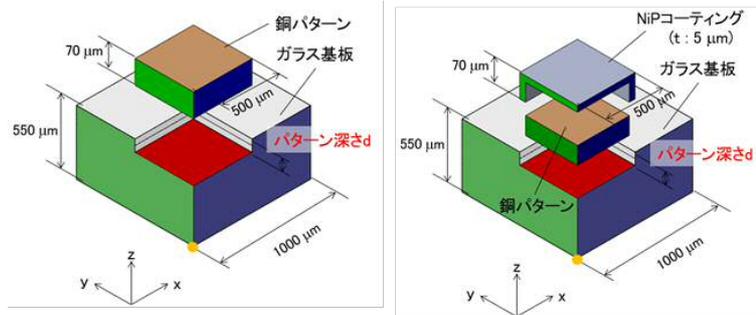


図 26 密着強度の測定結果

1-1-7 無電解 Ni めっきによるガラス基板の信頼性向上のメカニズム解明

1-1-6の結果より、ガラス基板上へ Cu めっきのみを施したサンプルと Cu めっき後に無電解 Ni/無電解 Au めっきまで施したサンプルでは、後者の方が耐温度サイクル特性が向上した。これは、Cu めっきにおいて発生した応力が無電解 Ni めっきによって緩和されたと考えられる。そのため、Cu めっき上に無電解 Ni めっきを施すことによる熱応力の変化を数値解析により検討した。

図 27(a)、(b)に解析モデルの概略を示す。ガラス基板は一辺 2mm、厚さ $550 \mu m$ の直方体形状とし、その上面に一辺 1mm、厚さ $70 \mu m$ の直方体形状のめっきを固定した。無電解 Ni めっき（厚さ $5 \mu m$ ）を施す場合には、外寸が前述の値となるようにした。ガラス基板のめっきを施す部位にあるレーザ加工溝の深さは $1 \mu m$ とした。対称条件を用いて 1/4 を解析した。



(a) 無電解 Ni めっきなし (b) 無電解 Ni めっきあり

図 27 解析モデルの概略

表 2 に物性値を示す。ガラス基板には、通常の強化ガラスであるガラス基板 A に加え、線膨張係数が大きいガラス基板 B も対象とした。

表 2 物性値

	ガラス基板A	ガラス基板B	銅パターン	NiPコーティング
ヤング率	64GPa	64GPa	117GPa	64GPa
ポアソン比	0.20	0.20	0.33	0.3
線膨張係数	9.8×10^{-6}	12.5×10^{-6}	16.8×10^{-6}	11.5×10^{-6}

温度を 120°C上昇させた場合の最大主応力分布を図 28 に示す。ガラス基板の種類を固定し、無電解 Ni の有無を比較すると、いずれのガラス基板についても無電解 Ni のある方が最大主応力は小さい。また、高膨張ガラス基板の方が最大主応力は小さい。以上に述べたように、銅に比べて線膨張係数が小さい無電解 Ni めっきを施すことで、めっき層の平均的な線膨張係数を小さくすることができ、熱応力が緩和することや、高膨張ガラス基板により熱応力を緩和できることが解析により確認された。

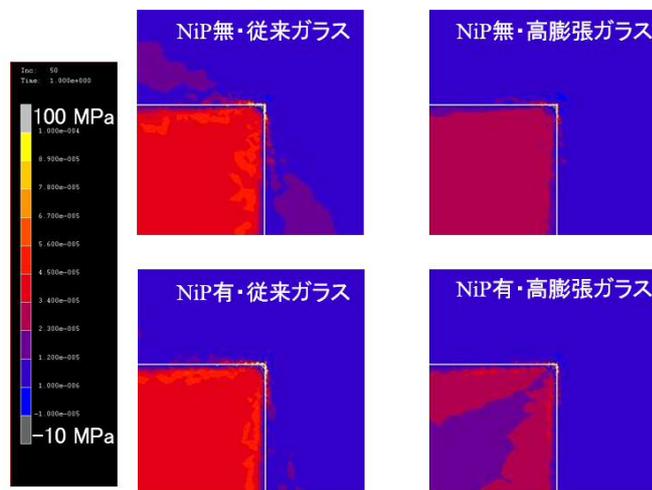


図 28 最大主応力

1-1-8 熱処理によるガラス基板の信頼性向上のメカニズム解明

1-1-6 で熱処理をすることで、耐温度サイクル特性が向上することが確認されたため、そのメカニズムを明らかにするための検証を行った。

滋賀県立大学の松岡教授によると、図 29 に示すように、ガラスの表面には水酸基(-SiOH)が存在するため、水分が滞留しやすくなる。水分の存在により、ガラスの強度が低下するが、熱処理をすることで水分とともにガラス表面の水酸基も減少するため、ガラス

の強度が増加する。このことが、熱処理によりガラス基板の信頼性が向上した要因と考えられる。この推察を実証するため、以下の検証を行った。

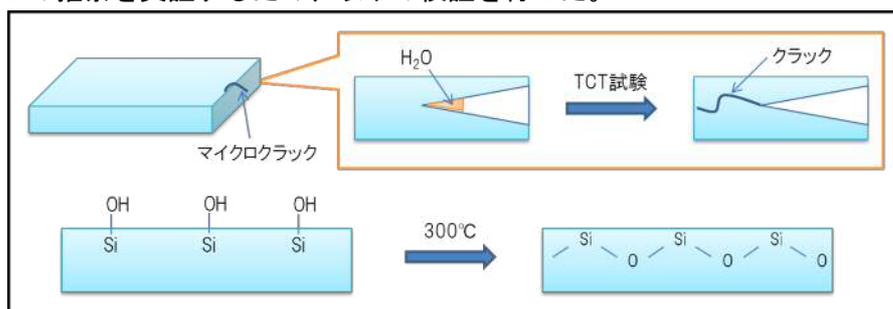


図 29 ガラスの表面状態とクラック発生原因

まず、熱処理前後のガラスの破壊強度の測定を行った。測定は、万能材料試験機を用いて図 30 に示す方法で行った。その結果、図 31 に示すように熱処理前の破壊強度が 500～700MPa 程度あったのに対し、300°C-1h の熱処理をすることで 750～900MPa 程度まで増加し、熱処理によりガラスの破壊強度が向上することが明らかとなった。

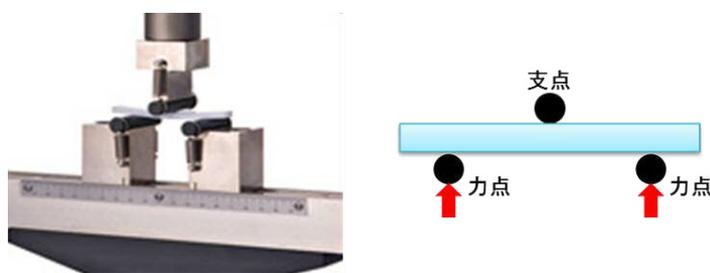


図 30 ガラスの破壊強度の測定方法

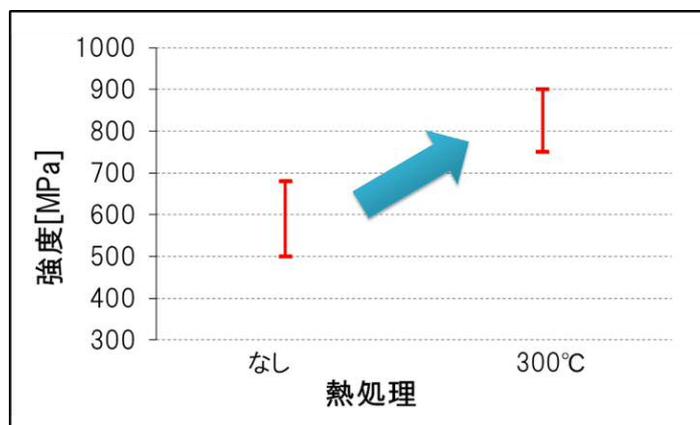


図 31 熱処理 (300°C-1h) 前後のガラスの破壊強度

次に、グロー放電発光分析装置 (GD-OES) を用いて、ガラス表面から深さ方向の分析を行った。分析試料は、未処理の状態から高湿度下 (40°C, 95%RH) に 24 時間放置し、その後 300°C-1 時間の熱処理を行った。GD-OES による分析は、未処理、高湿度下放置後、熱処理後の各過程において実施した。分析結果を図 32 に示す。高湿度下に放置することでガラスの表層付近に存在する水酸基が増加するが、熱処理後には未処理のガラスと同等まで減少することが明らかとなった。

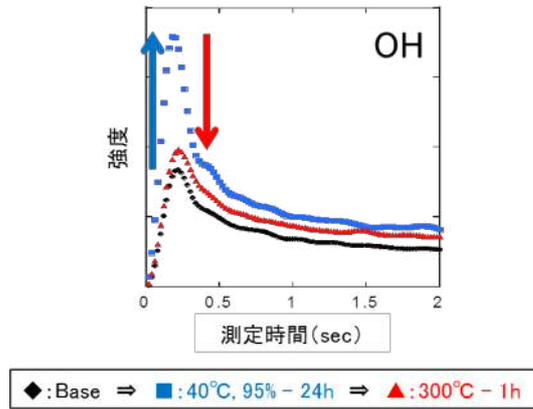


図 32 グロー放電発光分析によるガラスの深さ方向の分析結果

1-1-9 TH 周りの熱応力の解析

ガラス基板に TH を形成しその後 Cu めっきを施すことで、TH 周辺にかかる応力の明確化および TH 側壁のテーパ形状が応力に及ぼす影響を調査した。

具体的には、表面に圧縮残留応力を有する強化ガラスに TH を形成し、そこに Cu めっきを施し、温度を 120°C 上昇させた場合の応力状態を数値解析により検討した。

図 33 に解析モデルの概略を示す。直径 6mm、厚さ 0.55mm の強化ガラスに直径 0.5 mm のスルーホールを形成し、その内部および周辺に厚さ 70 μm の銅めっきを施している。解析に際しては上下方向の対称性により厚さ 0.275 mm の領域のみを考慮し、軸対称により周方向に中心角 1°C の領域を計算した。また、解析に使用した物性値には表 1 と同様の値を用いた。

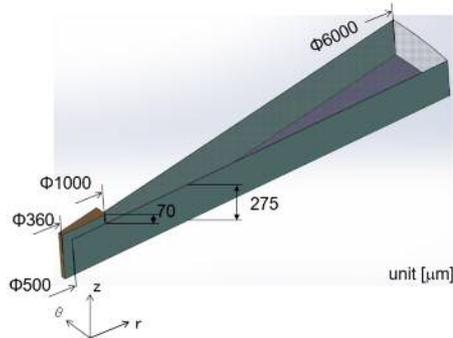


図 33 解析モデルの概略

図 34 は温度上昇後の TH 近傍の最大主応力を左図に、最小主応力を右図に示す。なお、ガラスに着目するため、銅めっき部は表示していない。最小主応力の右図に見られるように、表面には初期の残留応力とほぼ同程度の圧縮応力が残っている。また、最大主応力の左図において、TH の端部近傍に約 120MPa の最大応力が観察された。

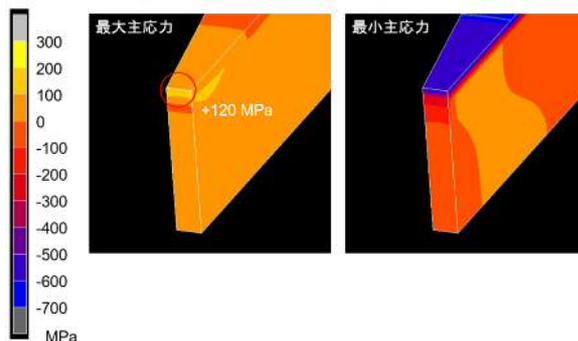


図 34 TH 近傍の最大・最小主応力

さらに、表面に圧縮残留応力を有する強化ガラスにテーパ付き TH を形成し、そこに銅めっきを施し、温度を 120°C 上昇させて場合の応力状態を数値解析により求め、熱応力に与えるテーパの影響についても検討した。

図 35 に解析モデルの概略を、図 36 に TH の概略を示す。直径 6mm、厚さ 0.55mm の強化ガラスに最小径 0.5 mm の TH を形成し、その内部および周辺に厚さ 70 μm の銅めっきを施している。解析に際して、軸対称により周方向に中心角 1° の領域を計算した。また、テーパ無しおよび両側テーパについては、上下方向の対称性により厚さ 0.275 mm の領域のみを考慮したが、片側テーパについては厚さ方向の全領域について計算した。解析に使用した物性値には表 1 と同様の値を用いた。

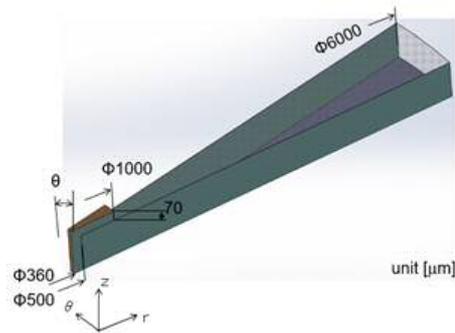


図 35 解析モデルの概略

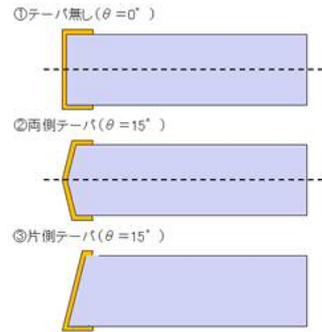


図 36 TH の概略

図 37 は温度上昇後の TH 近傍の最大主応力を左図に、最小主応力を右図に示す。なお、ガラスに着目するため、銅めっき部は表示していない。最小主応力の右図に見られるように、表面には初期の残留応力とほぼ同程度の圧縮応力が残っている。また、最大主応力の左図において、TH の端部近傍に最大応力が観察された。

図 38 にガラス表面の最大主応力分布を示す。いずれのテーパについても、TH 縁に生じる最大主応力値に大きな差は見られなかった。

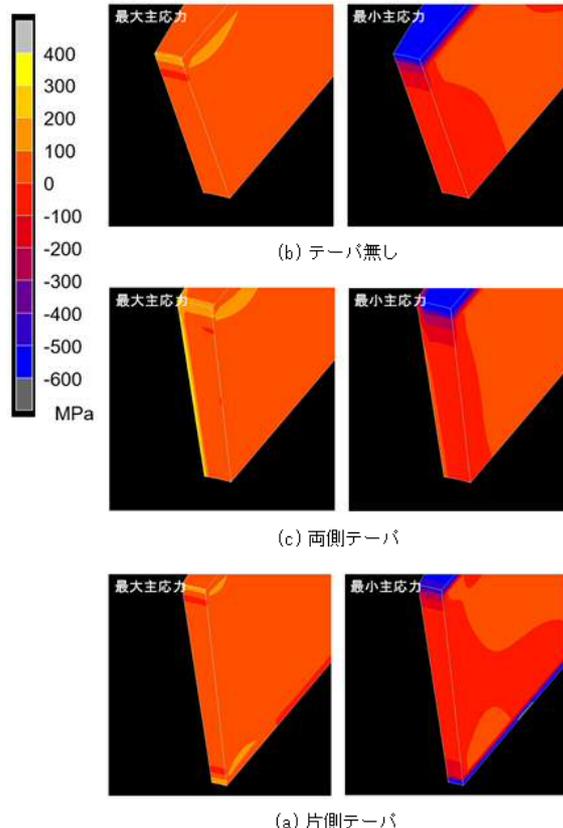


図 37 主応力分布

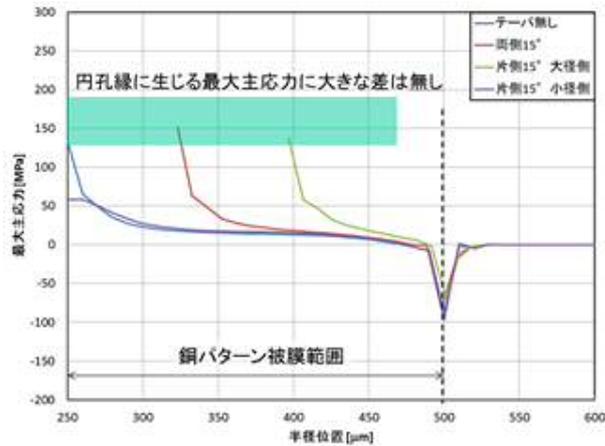


図 38 ガラス表面の最大主応力分布

1-1-10 めっき角部の熱応力

めっき角部に生じるガラスの割れ方には 2 種類のパターンが存在することが分かっている。本節では、数値解析によりその原因を検討した。

図 39 に解析モデルの概要を示す。Cu パターン角部での応力集中の評価を目的とし、同図に示すように 1/4 モデルを採用し、 $1,000\mu\text{m} \times 1,000\mu\text{m} \times 550\mu\text{m}$ のガラス基板に深さ d の溝を付け、その溝に厚さ $70\mu\text{m}$ の Cu パターンを取り付けた。角部の R は $0\mu\text{m}$ (四角)、溝深さ d は $1\mu\text{m}$ とした。また、ガラス基板と Cu パターンの接触条件は、パターン剥離がない状態を想定した接着条件 (接触部における相対変位がゼロ) と、パターンの全面剥離を想定した接触条件 (接触面に平行な相対変位は自由。ただし接触面の法線方向の相対変位はゼロ) の 2 種類とした。全節点に対して温度上昇 $\Delta T = 120^\circ\text{C}$ を与え、定常熱応力解析を実施した。解析に使用した物性値には表 1 と同様の値を用いた。

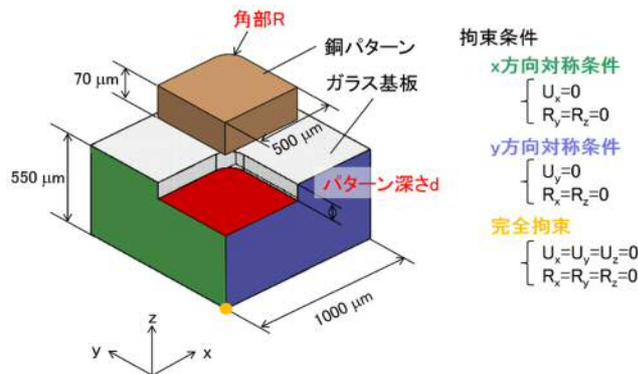
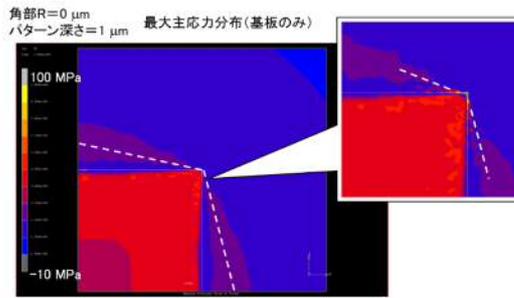
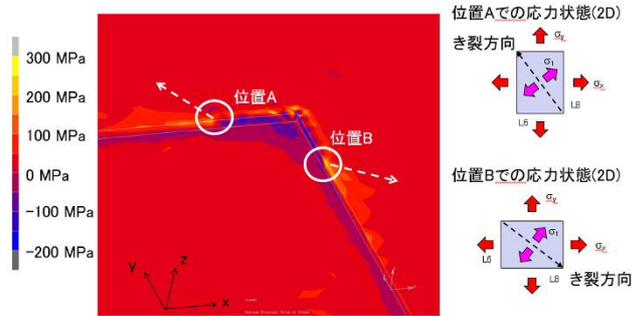


図 39 解析モデルの概要

パターン剥離がない状態を想定した接着条件における最大主応力分布を図 40(a)に、角部の詳細を図 40(b)に示す。図 40(b)において最大主応力の方向を検討した結果、き裂は Cu パターン角部に対して 5 時および 10 時方向に発生すると予想された。パターン剥離を想定した接触条件における最大主応力分布を図 41(a)に、角部の詳細を図 41(b)に示す。図 41(b)において最大主応力の方向を検討した結果、き裂は Cu パターン角部に対して 2 時方向に発生すると予想された。以上の結果より、き裂発生時のめっきとガラスの接合状態により、2 種類の割れパターンが発生したものと推測される。

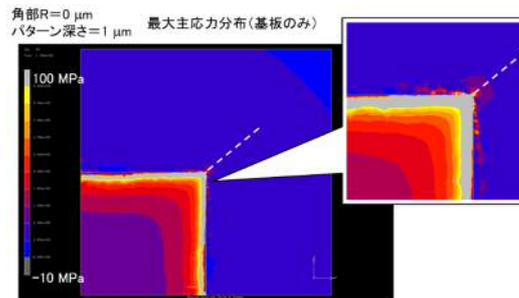


(a) 最大主応力分布

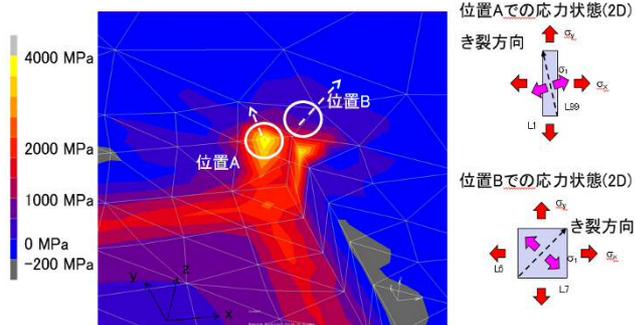


(b) 角部の詳細

図 40 接着条件における最大主応力分布



(a) 最大主応力分布



(b) 角部の詳細

図 41 接着条件における最大主応力分布

1-1-1-1 温度サイクル試験における信頼性の確認

1-1-6で最も良好な結果が得られた工程を適用してガラス基板を作製し、温度サイクル試験およびめっき皮膜の密着強度測定を実施した。

その結果、試験後にガラスの割れはなく、めっき皮膜の密着強度についても低出力レーザを用いて作製したサンプルと遜色ない良好な密着強度を示した。

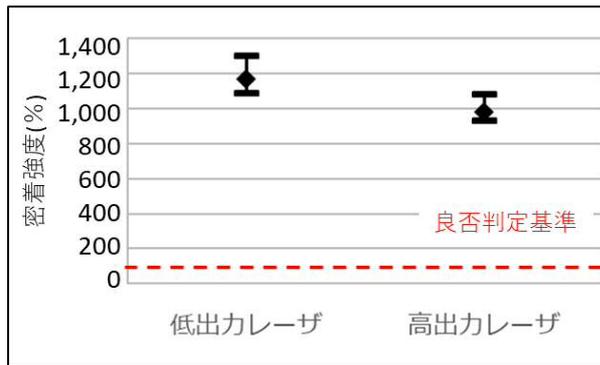


図 42 低出力レーザーおよび高出力レーザーを用いたサンプルの密着力測定結果

1-2 高電圧・高電流パワーデバイスに対応する金属配線の品質向上

パワーデバイスは高電圧・高電流下で使用されるため、金属配線の品質として、低抵抗化および厚膜化が要求されている。

1-2-1 Cuめっき皮膜の品質調査

4種類（めっき液 A、B、C および D）の電解 Cuめっき液を用いて図 18 に示す加工エリアに図 19 と同様の工程にて電解 Cuめっきまで施したガラス基板を作製し、電気抵抗率の測定を行った結果、めっき液 B を除く、3種類のめっき液において良好な結果が得られた。今後は、最も電気抵抗率の低いめっき皮膜が得られた、めっき液 A を用いて評価を進める。

1-2-2 Cuめっき皮膜の均一電着性の検討

多数あるパラメータの組み合わせでめっき条件①～⑦の計 7 水準のめっき条件にて配線パターンにめっきを行い、パターン全体とチップ搭載箇所の両者に対して均一電着性の確認を行った。

その結果、めっき条件③にて電解 Cuめっきを施した際に最も膜厚分布が小さく、パターン全体では±10%程度、チップ搭載箇所では±5%程度であった。

本検討の目的は、チップとの接合信頼性を確保することであるため、チップ搭載箇所で良好な結果が得られた、めっき条件③で問題ないとする。

2 高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化

2-1 高出力極短パルスレーザーによる表面粗化及び TH 形成条件の最適化

高出力のレーザー発振器を導入し、レーザー加工条件の最適化により、加工時間の短縮化を検討した。表面粗化に要する加工時間としては、1/5 倍短縮、TH 形成に要する加工時間としては、1/60 倍短縮を目標とした。

2-1-1 発振器の高出力化による加工時間の短縮

走査速度、繰り返し周波数およびピッチ間隔をパラメータとする各種レーザー加工条件にて評価パターンの加工を行い、表面粗化（表面、裏面）および TH 形成に要する加工時間の確認を行った結果、当初の加工時間に対する現状の最短加工時間は、表面粗化に要する加工時間が 1/6 倍短縮、TH 形成に要する加工時間が 1/5 倍短縮と大幅に短縮することができた。

2-1-2 レーザービーム径の拡大による加工時間の短縮化

レーザービーム径を拡大して評価パターンの加工を行い、表面粗化（表面、裏面）および TH 形成に要する加工時間の確認を行った結果、表面粗化時間、TH 形成時間ともに、さらに加工時間を短縮することができた。当初の加工時間と比較すると、表面粗化に要する加工時間が 1/7 倍短縮、TH 形成に要する加工時間も 1/7 倍短縮まで低減することができた。

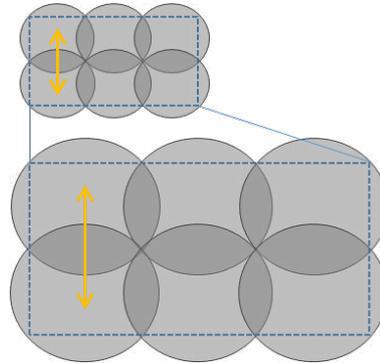


図 43 ビーム径と加工面積

2-1-3 レーザ加工方法の最適化による TH 形成時間の短縮

TH 形成時のレーザー加工方法、具体的には 1) レーザ走査方法、2) TH の穴径、3) $f\theta$ レンズ径、4) 両面加工、5) レーザの焦点高さ、の最適化による TH 形成に要する加工時間の短縮化を検討した結果、当初と比較して 1/19 倍まで短縮できた。

2-2 高出力極短パルスレーザーによる配線除去及びスクライプ形成条件の最適化

配線除去およびスクライプ形成についても現在、加工時間が長く、表面粗化と同様に信頼性の確保をしつつ、目標時間内での加工を達成させる取組を推進する。

2-2-1 配線除去条件の最適化

配線除去工程は図 44 に示すように、電解 Cu めっき後にレーザー加工にて Cu めっき皮膜を除去し、その後化学エッチングにて金属残渣を完全に除去する、という 2 工程で行った。各種レーザー条件にて Cu めっき皮膜を除去した後の評価方法は、図 45 に示すようにレーザー加工時に Cu めっき部とガラス部を同時に加工し、カラー 3D レーザ顕微鏡によりガラス部の表面粗さを測定することでレーザーによるガラスへのダメージを定量的に評価した。また、Cu めっき部はレーザー加工および化学エッチングをしたのちに、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) にて元素分析を行った。

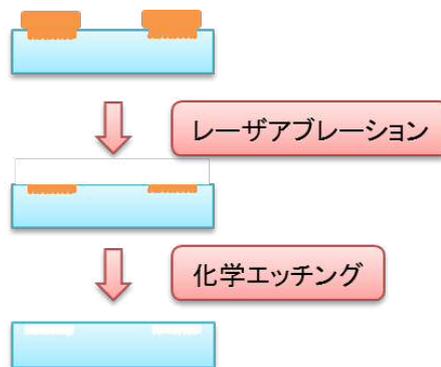


図 44 配線除去工程

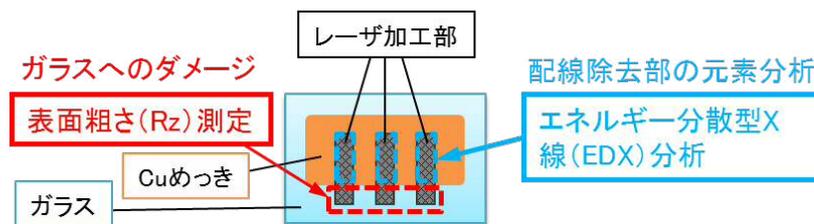


図 45 評価方法

図 46 にレーザ加工によるガラスへのダメージを示す。レーザのエネルギー密度が同等の場合においてもレーザ加工機 A の方がガラスへのダメージは小さい、という結果となった。また、配線除去部の EDX 分析を行った結果、レーザ加工後に化学エッチングを行うことで、金属残渣を除去することが可能であった。

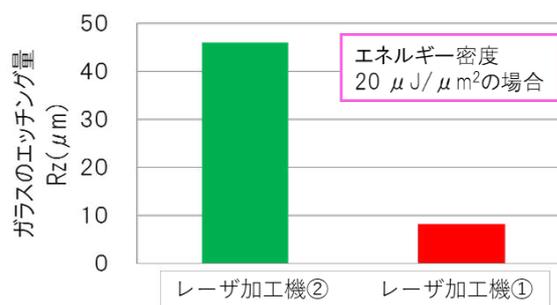


図 46 レーザ加工によるガラスへのダメージ

次に、配線除去幅の検討を行った。検討方法としては、図 47 に示すように導通配線を形成後レーザ加工により導通配線を一部除去し、化学エッチングにより金属残渣を除去した後にリーク電流の測定を行った。配線除去幅は、3 水準で実施し、リーク電流の測定は耐電圧・絶縁抵抗試験器を用いて図 47 の 4) に示すように配線除去部の両側に一定電圧を印加した際に検出される電流値を読み取った。

その結果、配線除去幅 3 水準全てのサンプルにおいてリーク電流は試験器の検出限界以下であることを確認した。

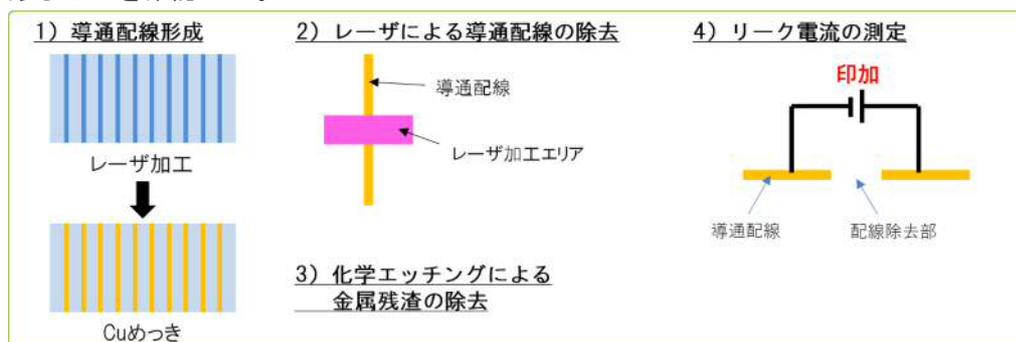


図 47 配線除去幅検討方法

2-2-2 スクライブ形成条件の最適化

スクライブの深さおよび形状と割断時の破壊強度の関係を明確にし、ガラス基板を損傷することなく個片化する方法を検討した。

ガラス表面に対し、低出力レーザを用いてスクライブを形成した。スクライブの形状および深さは、光学顕微鏡により評価した。その後、スクライブ面を下側にしてガラスを配置し、万能試験機により三点曲げ試験を行い、割断に必要な破壊強度を測定した。

光学顕微鏡によりスクライブ形状を確認した結果、走査回数が少ないとスクライブ先端は丸まっているが、走査回数を増やすとスクライブ先端が尖っていく。その後、またスクライブ先端が徐々に丸まってくるのが分かった。また、走査回数の増加によりレーザー光の入り口の直径が少しずつ広がっていくことが確認できた。

次に、スクライブ深さと破壊強度の関係を調査した。スクライブがないガラスの破壊強度はおよそ 50 N であるが、ガラス表面にスクライブが形成されることで破壊強度は大きく低下した。破壊強度は、スクライブ深さが深くなるにつれて小さくなり、深さが 40 μm になると破壊強度は 10 N 程度まで低下し、その後はスクライブ深さが増加しても破壊強度はあまり変化しなくなった。

三点曲げ試験後のガラスの外観写真を図 48 に示す。スクライブがないガラスおよびスクライブ深さが浅いガラスは、ガラス端面から割れが多数発生していることが確認できる。それに対し、スクライブ深さがある程度深いガラスは、スクライブに沿って、ガラスが割断されている。

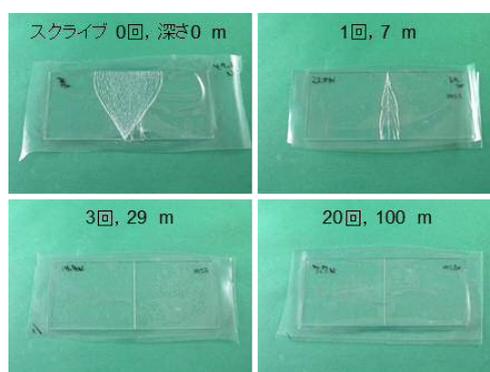


図 48 破壊試験後の外観写真

最後に、上記調査結果をもとに 2-1-1 で導入した高出力のレーザー加工機を用いてスクライブ形成する際に要する加工時間を確認した。大判ガラスから個片化することを想定した場合、1 枚当たりのスクライブ形成は図 49 に示す 2 箇所である。この 2 箇所のスクライブ形成に要する加工時間は 0.9sec であった。

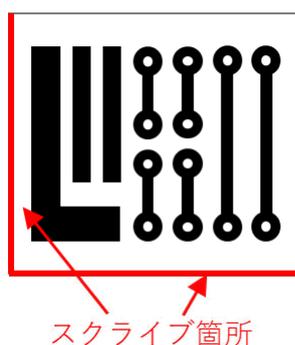


図 49 スクライブ形成箇所

第3章 全体総括

(1) ガラス基板の信頼性確保

項目	目標	達成率
【1】ガラス基板の信頼性確保		
【1-1】温度サイクル試験での信頼性の向上	①温度サイクル試験における信頼性	100%
	②温度サイクル試験後の密着強度	100%
【1-2】高電圧・高電流パワーデバイスに対する金属配線の品質向上	①Cuめっき皮膜の均一電着性	100%
	②Cuめっき皮膜の電気抵抗率	100%

処理工程内で熱処理を行うことで耐温度サイクル特性が向上しており、これらの熱処理を行うことで、当初の目標である温度サイクル試験後にガラスの割れがなく、金属配線の密着強度も確保できることを確認した。

また、ガラスの信頼性向上のメカニズム解析として、熱処理の効果と無電解 Ni めっきの効果を確認した。熱処理によりガラス表面の水酸基が減少し、ガラスの破壊強度が増加することが明らかとなった。さらに、ガラス上に Cu めっきを施すと配線パターンの角部を中心に応力が高くなるが、Cu めっき上に無電解 Ni めっきを施すことで発生した応力が緩和されていることが、熱応力解析により明らかとなった。

金属配線の品質については、電解 Cu めっき液の評価を行い、当初より目標としていたCu めっき皮膜の電気抵抗率を満足できるめっき液を選定した。また、選定しためっき液を用いてめっき条件の最適化を行い、チップ搭載箇所の均一電着性が±5%となるめっき条件を確立した。

(2) 高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化

項目	目標	達成率
【2】高出力極短パルスレーザーによる加工条件の最適化		
【2-1】高出力極短パルスレーザーによる表面粗化及びTH形成条件の最適化	表面粗化(表面/裏面)、TH形成に要する加工時間	85%
【2-2】高出力極短パルスレーザーによる配線除去及びスクライブ形成条件の最適化	①配線除去後、除去箇所の表面分析	100%
	②配線除去、スクライブ形成に要する加工時間	100%

高出力のレーザー加工機の導入およびレーザー加工条件の検討により加工時間の短縮化を行い、評価用パターンの加工時間を表面粗化は1/7倍短縮、TH形成は1/19倍短縮することができた。当初目標としていた、表面粗化時間1/5倍短縮、TH形成時間1/59倍短縮に対して、表面粗化時間については、目標を達成できた。

また、配線除去に最適なレーザー加工機を選定し、導入したレーザー加工機を用いて配線除去を行なった後にリーク電流の測定を行った結果、リーク電流は検出限界以下であった。

スクライブ形成については、大判ガラスの個片化を想定した検討を行い、一定深さ以上のスクライブを形成することで容易に割断することが可能であり、スクライブ形状を変えても破壊強度に大きな変化は生じないことを確認した。

配線除去およびスクライブ形成に要する加工時間は、それぞれ目標時間を大幅に下回る時間で加工することが可能であり、配線除去時間は目標の1/15、スクライブ時間は目標の1/17の時間で加工できた。

今後、本研究開発から得られた技術を適用し、川下企業への事業展開をはかっていく。