

[NEDO 助成事業] ポスト 5G 向けチップオンウェハダイレクト接合 3D 積層統合技術開発

Development of Chip-on-Wafer Direct Bonding 3D Stacking Technology for Post-5G

菊地 広 菱沼 隼 李 瑾 永田 憲雅 尾川 謙一

要旨

「ヤマハロボティクス株式会社(以下当社または YRC)」は、「ポスト5G向けチップオンウェハダイレクト接合3D積層統合技術開発」を NEDO 助成事業として実施した。本技術の実現に必要な要素技術である、①異物除去洗浄・前処理技術、②半導体チップ非接触ハンドリング技術、③異物検査技術、④接合技術の開発成果について報告する。

Abstract

“Yamaha Robotics Co., Ltd. (hereafter “the Company” or “YRC”)” carried out the *Development of 3D Integrated Chip-on-Wafer Direct Bonding Technology for Post-5G Applications* as a project subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). This report presents the development results of the key technologies necessary to realize this technology: (1) foreign particle removal and surface pre-treatment technology, (2) non-contact handling technology for semiconductor chips, (3) foreign particle inspection technology, and (4) bonding technology.

1 実施計画

1-1. 事業目的および目標

(1) 事業目的

本事業は、ヤマハロボティクス株式会社が提案した「ポスト5G向けチップオンウェハダイレクト接合3D積層統合技術開発」が、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より公募された「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業／先端半導体製造技術の開発」の助成事業として2022年8月に採択され、実施したものである。本事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人東京理科大学を共同研究先として実施した。

近年、半導体の性能向上とコスト低減を支えてきた前工程の微細化は限界に近づいており、これに代わる手段として後工程による性能向上が期待されている。特に、3次元実装などのチップ積層化技術は急速に適用が拡大しており、NAND FlashやDRAMなどのメモリ用途に加え、近年ではロジックLSIなどへの適用も始まっている。これに伴い、接合ピッチのさらなる微細化や電極接続抵抗の低減による高速信号伝送性能の向上が求められており、高性能な実装技術の開発ニーズが高まっている。

半導体後工程におけるボンダ装置市場は、今後5年間で年平均成長率3.5%の拡大が予測されている。中でも、先端半導体向けのボンダ市場は、今後5年間にわたり年平均成長率18%で推移すると予測されており、その後も継続的な成長が期待されている。

従来、日本の装置メーカーが優位性を持っていた半導体後

工程設備産業において、近年は欧米やアジアの競合企業が合併等を通じてシェアを拡大している。このような状況下で、日本の技術力を結集し、世界の競合に対抗する高度な技術力の確立が求められている。

そこで当社は、先端装置市場における競争力を維持するため、次世代の実装工法および設備の開発によりグローバル市場をリードしていく。本事業では、ポスト5G社会において活用が期待される先端半導体向けの「チップオンウェハ(以下、COW: Chip on Wafer)」ダイレクト接合技術を早期に確立し、ポスト5G社会の実現に貢献するとともに、半導体後工程設備市場における日本のシェア拡大を図ることを目的とする。

(2) 事業目標

近年、先端デバイスでは性能向上のため、バンブピッチの微細化が50μmを下回り、貫通電極を有するチップ厚も50μm以下の極薄LSIチップを8段に積層した高速メモリが量産されている。半導体の微細化が限界に近づく中、今後の社会における“デジタルトランスフォーメーション”を加速するポスト5G向け先端デバイスの実現には、複数のLSIを高度なパッケージ技術で組み合わせ、複雑な機能を実現する必要がある。そのため、パッケージ配線の微細化および実装電極ピッチの狭ピッチ化が不可欠であり、高周波特性のさらなる改善や省電力化の実現も求められている。これらを達成するには、従来のはんだ実装接合に代わり、金属電極間を直接接合する“ダイレクト接合技術”的実用化が必要である(図1、図2、図3参照)^{[1][2]}。

ダイレクト接合技術は、既に CMOS センサーなど一部の先端領域においてウェハ同士の貼り合わせによって実現されている。しかし、今後の3次元実装では、ウェハサイズやチップサイズの異なる LSI の積層接合が求められており、ウェハ同士の貼り合わせでは良品チップと不良品チップを接合してしまうなどのコスト面での課題があるため、COW によるダイレクト接合の実現が必要である。

COW によるダイレクト接合において最大の課題は、チップを個別に切断するダイシング工程で発生するパーティクルの除去である。

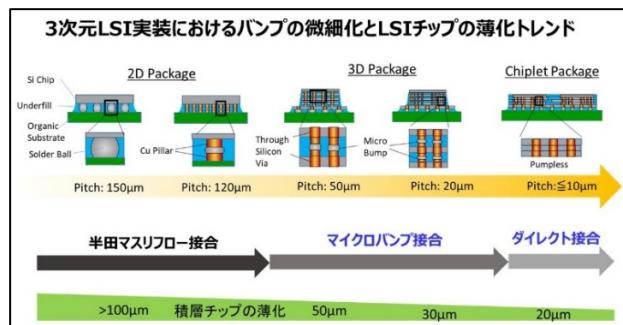


図1 3次元実装技術におけるバンプの微細化と
LSIチップの薄化トレンド

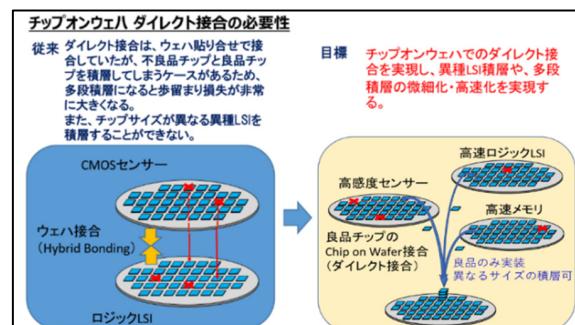
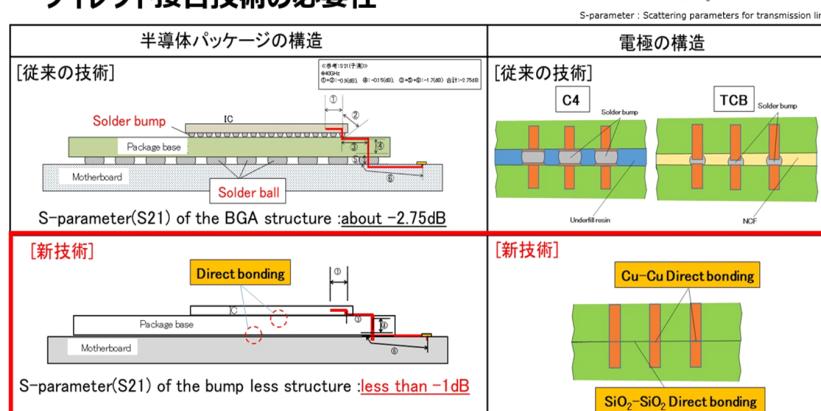


図2 ダイレクト接合技術の必要性

ダイレクト接合技術の必要性



高速信号伝送のため、ポスト5Gには、はんだを無くしたダイレクトボンディングが必須。

図3 チップオンウェハダイレクト接合技術の必要性

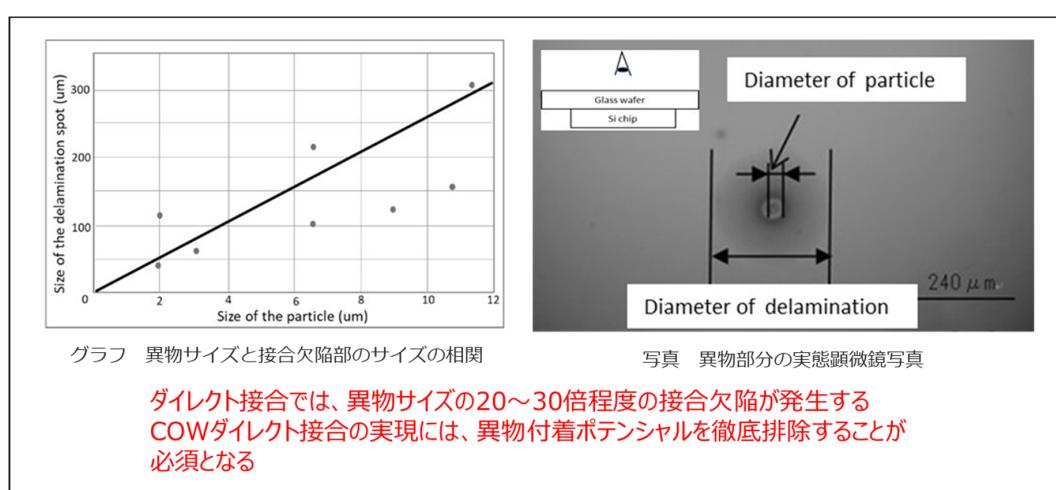


図4 ダイレクト接合への異物の影響

接合表面のパーティクルは接合界面に微小な剥がれを発生させ(図4参照)、電極の接続不良に直結する。このため、極めて高い清浄度が要求される。プラズマダイシングなど発塵の少ない工法の開発も進められているが、発塵を完全に防ぐことは困難であり、接合直前のパーティクル除去が不可欠である^[3]。

さらに、チップの多段積層ニーズの高まりに伴い、積層対象となるチップの薄化も進行しており(図1参照)、厚さ50μmを下回る極薄チップを損傷なく清浄な状態で実装するためのハンドリング技術も重要な課題となっている。

本事業では、ダイレクト接合技術を用いて、10μm レベルの狭ピッチ電極を有する50μm 以下の極薄チップの3次元実装を量産レベルで実現することを目指し、超清浄なハンドリングおよび前処理、異物除去、半導体チップ上の微小異物検査技術を確立し、COW による3D 積層の統合プロセス技術の構築を目標とした。

高精度なダイレクト接合技術を COW で実現し、その工法を組み込んだ設備の販売を通じて、高性能半導体およびポスト 5G 技術の実現に貢献し、設備販売事業の発展を目指す。

1-2. 研究開発の概要

ポスト5G 社会における“デジタルトランスフォーメーション”を加速する先端デバイスの3次元実装を実現するには、複数の半導体チップをダイレクト接合技術により COW で実装する必要がある。しかし、従来技術では、ダイシング後の半導体チップ表面に異物や汚れが残留し、接合品質に悪影響を及ぼすほか、薄化されたチップに損傷を与えるなど、実用化に向けた深刻な障害となっていた。この課題を解決するため、本事業では以下の4つの要素技術を開発した。

- ①異物除去洗浄・前処理技術
- ②半導体チップ非接触ハンドリング技術
- ③異物検査技術
- ④接合技術

これらの研究開発を通じて、厚さ50μm 以下の極薄チップを高い生産性と高歩留で実装可能な、環境配慮型 COW ダイレクト接合技術を構築し、ポスト5G 社会の実現に向けた先端半導体の開発に貢献する。

2 COW ダイレクト接合プロセス開発のコンセプト

2-1. 異物に関する課題と解決のためのコンセプト

COW ダイレクト接合を実現するための重要な課題として、“異物”に関する技術的障壁と、その解決に向けたコンセプトに

ついて、2項目に分けて説明する。

半導体チップ上に残留する異物の1つ目は、ダイシング後のチップ上面に付着する異物である。

写真1は、ミラーウエハをダイシングし、ダイシングライン近傍を金属顕微鏡で拡大観察した例である。ウエハをダイシングすると、ダイシングラインに沿って異物が付着する。異物は大きく分けて2種類に分類され、1つは Si 屑、もう1つは有機物異物である。

Si 屑は不透明で、Si ウエハに由来するものであり、ウエハ用パーティクルカウンタで検出可能である。

一方、有機物異物は半透明で、ダイシングテープに由来する。この半透明の有機物異物は、ウエハ用パーティクルカウンタでは検出が困難である。

COW ダイレクト接合を実現するには、微小な半透明有機物異物を除去する洗浄・表面処理技術と、これらの異物を検査する技術が必要である。

そこで本事業では、水素水を用いた異物除去技術および異物検査技術の開発を実施した。

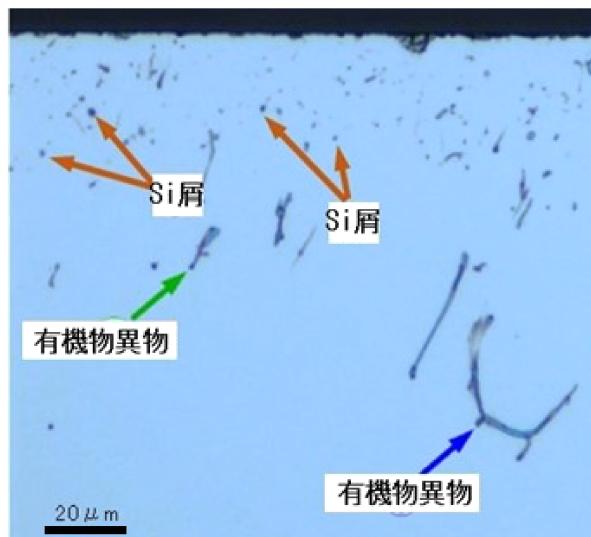
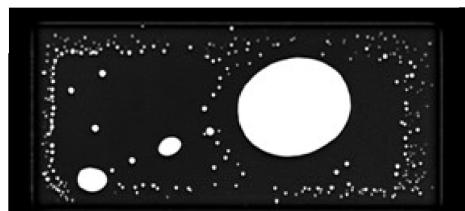
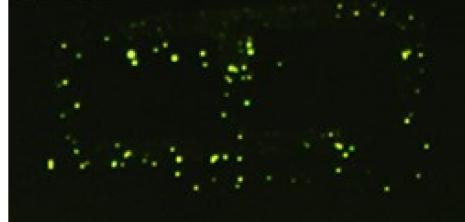
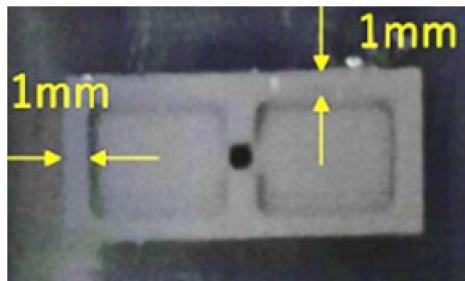


写真1 チップ上の異物観察例

半導体チップ上に残留する異物の二つ目は、チップ表面に治具が接触することにより付着する異物である。

写真2-1は、ポンダの搬送用コレットの外観である。通常、コレットと呼ばれる治具により、半導体チップを真空吸着して装置内を搬送する。

チップがコレットに接触すると、写真2-2のように、コレット形状に沿って異物がチップ表面に付着する。写真2-3は、COW 接合後の接合界面の SAT(Scanning Acoustic Tomography: 超音波映像装置)像である。この状態で COW 接合を行うと、コレット



トの接触痕に沿ってボイドが発生する。

そこで本事業では、この課題を解決するためのコンセプトとして、半導体チップの非接触ハンドリング技術の開発を実施した。

2-2. COW ダイレクト接合システムのコンセプト

図5は、プロセスの基本構想と NEDO 助成事業における各事業項目との関係を示す説明図である。

半導体前工程においてウエハが完成した後、真空プラズマ処理により表面を活性化する。その後、ウエハは半導体組立工程へ搬送され、ダイサーによってチップ個片に切断・分割される。個片化されたメモリチップは、COW ダイレクトボンディングシステムにより、異物除去およびプラズマ処理を施した後、COW 接合を行う。

本事業では、前述の4つの要素技術(①異物除去洗浄・前処理技術、②半導体チップ非接触ハンドリング技術、③異物検査技術、④接合技術)に基づき、以下の事業項目を実施した。

- ①接合表面の洗浄技術および前処理技術の開発
- ②半導体チップ非接触ハンドリング技術の開発
- ③①および②を組み合わせた統合プロセスの検討
- ④①～③の成果を定量的に検証するための、COW ダイレクト接合評価デバイスおよび評価技術の開発

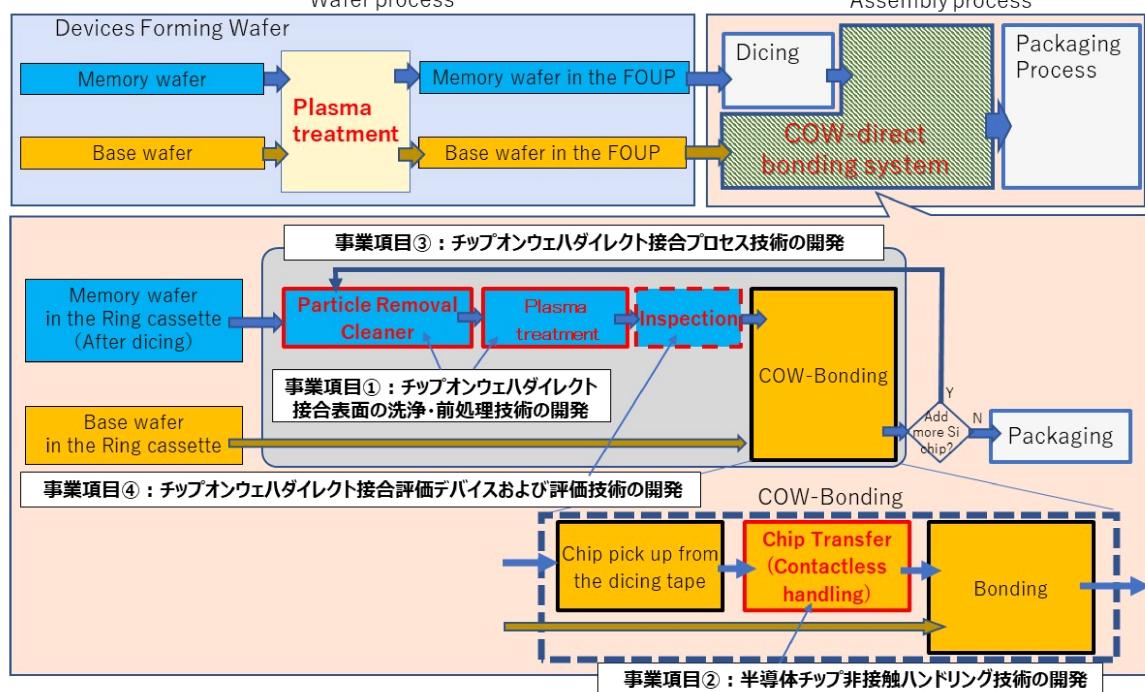


図5 本事業のプロセスの基本構想と事業項目の関係の説明図

3 要素技術開発

3-1. COW ダイレクト接合表面の洗浄・前処理技術

3-1-1. 異物除去洗浄技術開発

3-1-1-1. 異物除去洗浄プロセスおよび装置の概要

図6は、開発した異物除去洗浄プロセスの説明図である。

ダイシング後の Si チップをダイシングテープに載せた状態で、異物除去洗浄を行う。

まず、水素水と Megasonic(超音波洗浄)を用いて Si 屑を除去する。水素水に Megasonic を印加することでマイクロバブルが発生し、そのキャビテーション効果により異物を除去する^{[4][5]}。

次に、水素水 + Megasonic 洗浄とワイピング洗浄を併用し、樹脂異物を除去する。樹脂異物は粘着性が有るために、ワイピング材で浮かせた後、水素水と Megasonic で除去する。

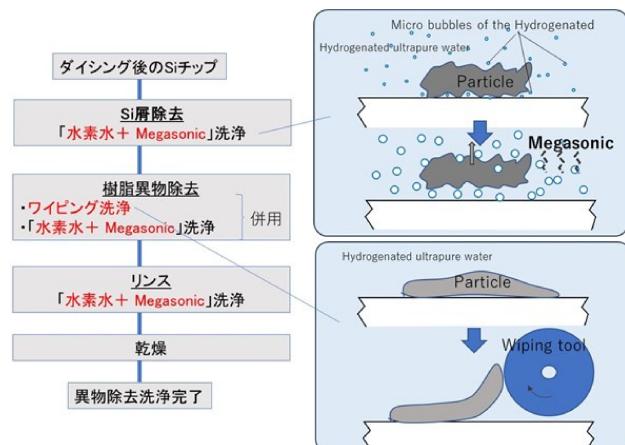


図6 開発した異物除去洗浄プロセスの説明図

続いて、水素水と Megasonic でリシスを行う。浮上した樹脂異物は粘着性があるため、再付着を防止する目的で水素水と Megasonic が有効に機能する。

最後に乾燥工程を経て、異物除去洗浄を完了する。

以下に、異物除去洗浄装置の構造および設計方針について説明する。

写真3は、異物除去洗浄装置の外観である。本装置は二階建ての構造であり、下段に異物除去洗浄装置本体、上段に大気圧プラズマ装置を配置している。将来的な量産対応を見据え、クリーンルーム内の設置面積を最小限に抑えることが重要である。このため、装置のフレーム構造を強化し、低背化を図ることで、二階建て構造を実現した。

また、装置上部にはクリーン化のための HEPA フィルタを搭載しており、定期交換に対応するため、一階の装置と二階の装置間には必要最低限の高さを確保している。

写真4は、異物除去洗浄装置の洗浄チャンバ付近の拡大写真である。本装置には、水素水に超音波を印加して洗浄対象物に吹き付ける“水素水 + Megasonic アーム”と、水素水を掛けながらワイピングを行う“水素水 + ワイピングアーム”が搭載されている。両アームはそれぞれ独立して動作可能である。

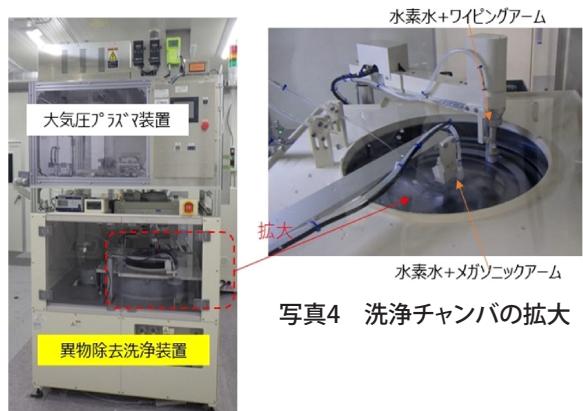


写真4 洗浄チャンバの拡大

写真3 異物除去洗浄装置外観

写真5は、“水素水 + Megasonic アーム”的外観である。水素水はチューブを介して供給され、アーム先端の超音波ヘッドに導入される。ヘッド内で水素水が振動することで、水素のマイクロバブルが形成される。

アーム先端部は傾斜構造となっており、洗浄対象物に対して超音波ヘッドを最適な角度に設定することが可能である。

写真6は、“水素水 + ワイピングアーム”的洗浄時の外観である。アームの先端には、適度な弾性を有し、微小な異物をごく軽い圧力で除去する効果を持つワイピング材を取り付けている。



写真5 水素水 + Megasonic アーム

写真6 水素水 + ワイピングアーム

3-1-1-2. 洗浄効果の検証

2024年度の目標である、“1μm以上の異物が洗浄後のチップ上で10個以下”を証明するため、異物を試験サンプル上に故意に多数付着させ、洗浄効果の確認を金属顕微鏡により実施した。

写真7は、Si屑の除去例である。Si屑散布後には無数の異物が確認されたが、洗浄後にはすべて除去された。

写真8は、シリコーン樹脂異物の除去例である。

シリコーン樹脂異物散布後には多数の異物が確認されたが、洗浄後にはすべて除去されている。

なお、写真7と写真8の拡大写真で示した通り、洗浄後のチップ端面でチッピングなどの欠陥は発生していない。

3-1-1-3. 乾燥残りの状況

次に、開発した QPM (Quantitative Phase Microscopy: 定量位相顕微鏡) 異物検査装置を用いて異物検査を実施した (QPM の詳細は3-3項にて説明する)。

図7は、QPMによる異物検査の一例である。6mm × 13mmのチップ表面を12 × 21のブロックに分割し、各ブロックに0.3μm以上の異物数を数値として表示している。

この検査により、金属顕微鏡では検出されなかった乾燥残りが新たに確認された。

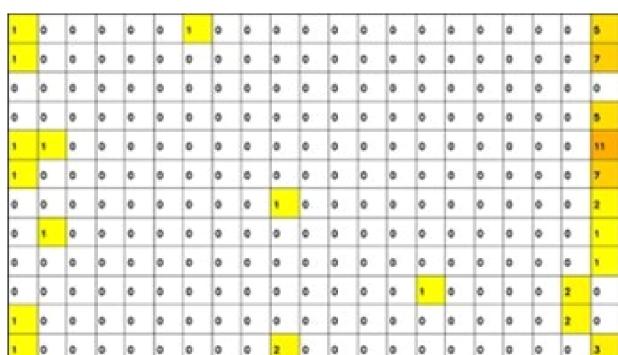


図7 QPMによる異物検査の一例(水素水洗浄後)

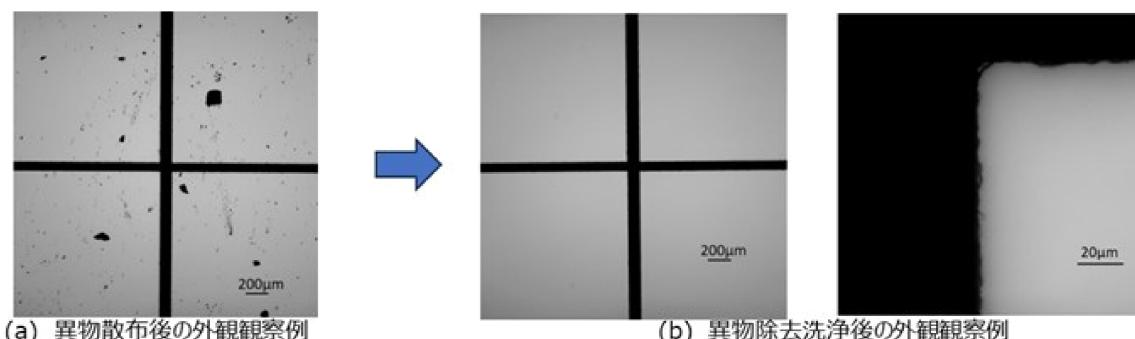


写真7 Si 層の除去例

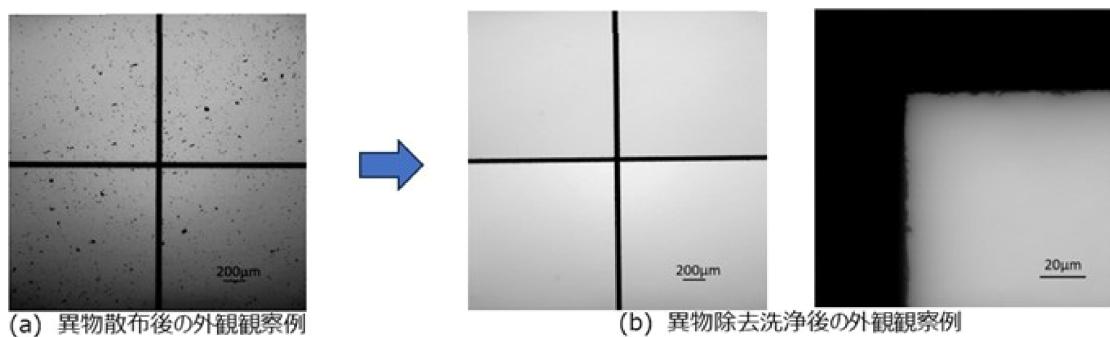


写真8 シリコーン樹脂異物の除去例

写真9-1は、ダイシング時に発生した乾燥残りの金属顕微鏡写真である。検出された異物は、微小な異物が線状に連なる乾燥残りが多く含まれていることが判明した。なお、この乾燥残りは、乾燥後に時間が経過すると写真9-2に示すとおり、水素水洗浄を用いても完全に除去することは困難である。

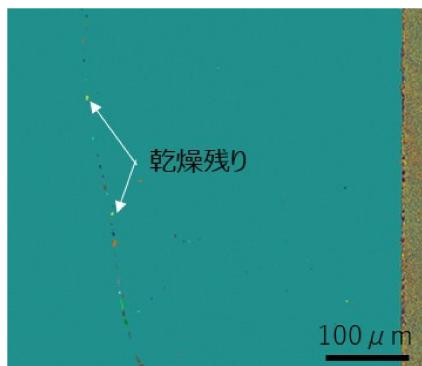


写真9-1 ダイシング後
乾燥不良の金属顕微鏡写真(水素水洗浄前)

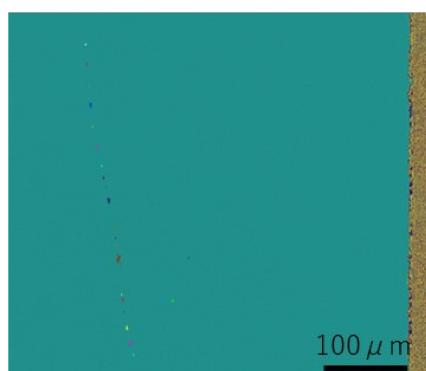


写真9-2 ダイシング後
乾燥不良の金属顕微鏡写真(水素水洗浄後)

3-1-1-4. 乾燥残りの対策

図8に、乾燥残りの対策方法の説明図を示す。

従来の後工程では、ダイシング後のチップをそのまま接合に使用していた。

ダイシングは、ウエハからチップを切り出す個片化と洗浄および乾燥で構成される。本事業では当初、ダイシング後に水素水による異物除去洗浄を実施し、その後にプラズマ処理による表面活性化を行い、最後に接合することを想定していた。しかし、この方法では前述のとおり、ダイシング時に乾燥残りが発生する。

そこで、乾燥残りを防止する方法として、ダイシング後にウエハを速やかに水素水に浸漬し、乾燥させることなくダイシング装置から異物除去洗浄装置まで移動し、直ちに水素水による洗浄を行った。

水素水の浸漬は、樹脂製の容器に新鮮な水素水を満たし、その中にダイシング後のウエハを速やかに投入することで実施した。この処理により、ダイシング装置から洗浄装置への移動中の乾燥を防止することが可能となった。

なお、詳細は3-1-3項に記載するが、水素水によるCu電極の酸化抑制効果により、Cu電極の酸化を防止することが可能である。

表1は、対策プロセス適用前後のQPM異物検査結果である。プロセスの改善(水素水浸漬の適用)により、乾燥残りを含む異物を低減し、本事業の最終目標である10個/chip以下(異物サイズ0.3μm)を達成した。

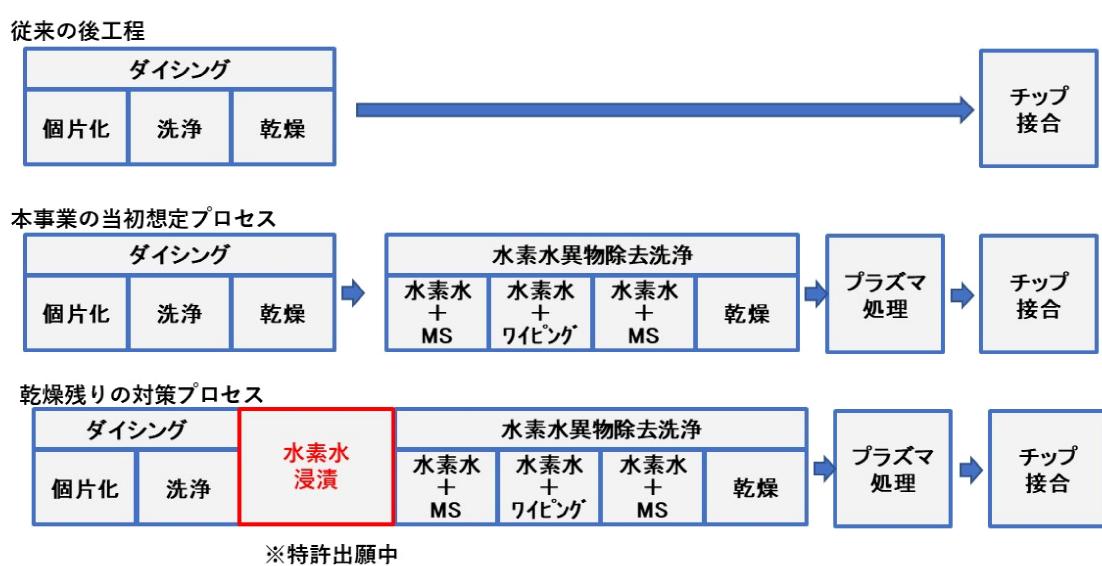
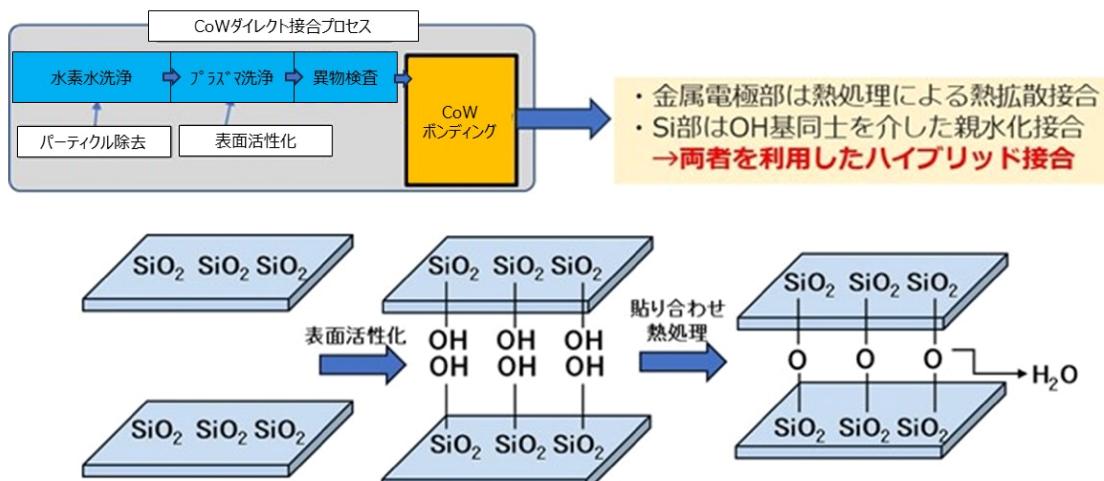
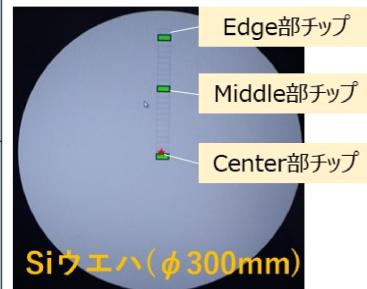


図8 乾燥残りの対策方法の説明図

表1 対策プロセス適用前後のQPM異物検査結果
(目標:10個/chip以下(異物サイズ0.3μm)。チップサイズ:6mm×13mm)

異物除去洗浄プロセス	Edge部チップ	Middle部チップ	Center部チップ
改善前の異物除去洗浄プロセス	・0.3μm以上の異物数:37 [内訳] 1μm以上異物数:6 0.3μm以上1μm未満:31	・0.3μm以上の異物数:7 [内訳] 1μm以上異物数:0 0.3μm以上1μm未満:7	・0.3μm以上の異物数:0 [内訳] 1μm以上異物数:0 0.3μm以上1μm未満:0
改善後の異物除去洗浄プロセス	・0.3μm以上の異物数:10 [内訳] 1μm以上異物数:0 0.3μm以上1μm未満:10	・0.3μm以上の異物数:8 [内訳] 1μm以上異物数:4 0.3μm以上1μm未満:4	・0.3μm以上の異物数:1 [内訳] 1μm以上異物数:1 0.3μm以上1μm未満:0



3-1-2. プラズマ処理による表面活性化

本稿では、プラズマによるSiチップおよびSiウェハの表面活性化処理の説明を行う。図9は、ダイレクト接合の概要説明である。また、参考として、写真10に真空プラズマ装置の外観を、図10にその構成概略図を示す。

ダイレクト接合は、Siチップ上の銅電極の接合に加え、 SiO_2 の接合も必要である。このため、ハイブリッド接合とも呼ばれる。

SiO_2 同士の接合(親水化接合)は、水酸基(OH)を介して行われるため、 SiO_2 表面は高い表面活性化エネルギーを有する状態であることが求められる。そこで、新たに導入した真空プラズマ装置による SiO_2 面の表面活性化効果を検証した。



写真10 真空プラズマ装置の外観

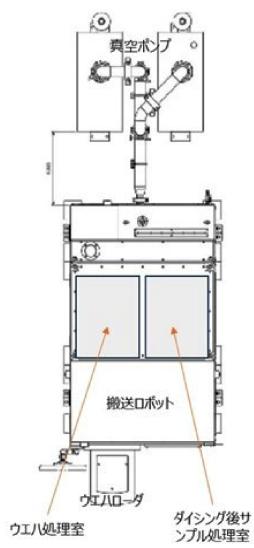


図10 真空プラズマ装置の構成

表2は、真空プラズマ処理の前後における親水性を純水の接触角で比較した結果である。

Si熱酸化膜およびCu薄膜のいずれも、真空プラズマ処理を施すことで純水の接触角が小さくなり、濡れ広がる状態となった。

以上の結果から、真空プラズマ処理により、SiO₂面およびCu表面の活性化エネルギーが向上することが証明された。

表2 真空プラズマ処理前後の親水性比較

	純水接触角(度)	
	処理前	処理後
Si熱酸化膜	35.42	6.12
Cu薄膜	46.55	15.16

3-1-3. 水素水およびプラズマ処理がCu表面に与える影響の解析

3-1-3-1. 大気中放置によるCu表面状態の変化

図11は、大気中放置によるCu表面状態の変化をXPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy:X線光電子分光法)により分析した結果である。使用したサンプルは、ウェハ上にCuを成膜したものである。

前処理として酢酸溶液中に浸漬し、あらかじめ酸化物を除去した。

この前処理を実施する前は、金属Cuに加え、Cu₂O、さらに酸化が進行したCuOおよびCu(OH)₂(水酸化銅)、CuCO₃(炭酸銅)が検出された。

前処理を施すことでCuO、Cu(OH)₂およびCuCO₃は除去され、金属CuとCu₂Oのみが検出された。

この状態でクリーンルーム中に静置すると、2日目以降に表面酸化が進行し、金属CuおよびCu₂Oが減少し、CuO、Cu(OH)₂およびCuCO₃が増加した。

なお、この酸化の進行は約14日で安定した。

3-1-3-2. 水素水浸漬およびプラズマ処理の影響解析

図12は、水素水浸漬およびプラズマ処理の影響解析結果である。前処理後12日間クリーンルーム中に放置したサンプルを、非脱気水、脱気水および水素水に浸漬したところ、CuCO₃、Cu(OH)₂、およびCuOが減少し、ほとんどが金属CuとCu₂Oになることが確認された。金属Cuの比率は、非脱気水<脱気水<水素水の順番であった。

また、同様のサンプルを大気圧プラズマに処理すると、Cuの酸化がさらに進行することが確認された。一方、真空プラズマ処理を施すことで、Cuの酸化物が減少することが確認された。これは、処理雰囲気中の酸素の残留量の違いによると考える。

以上の結果から、本事業では水素水による異物除去と真空プラズマによる前処理を採用することとした。

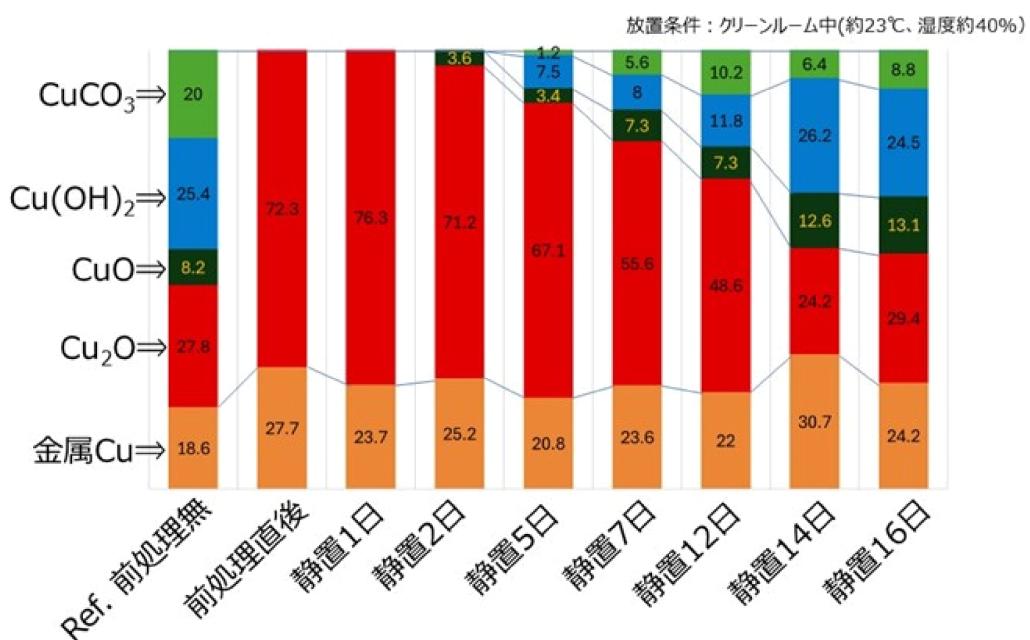


図11 大気中放置によるCu表面状態の変化をXPSにより調べた結果(グラフ中の数字は%)

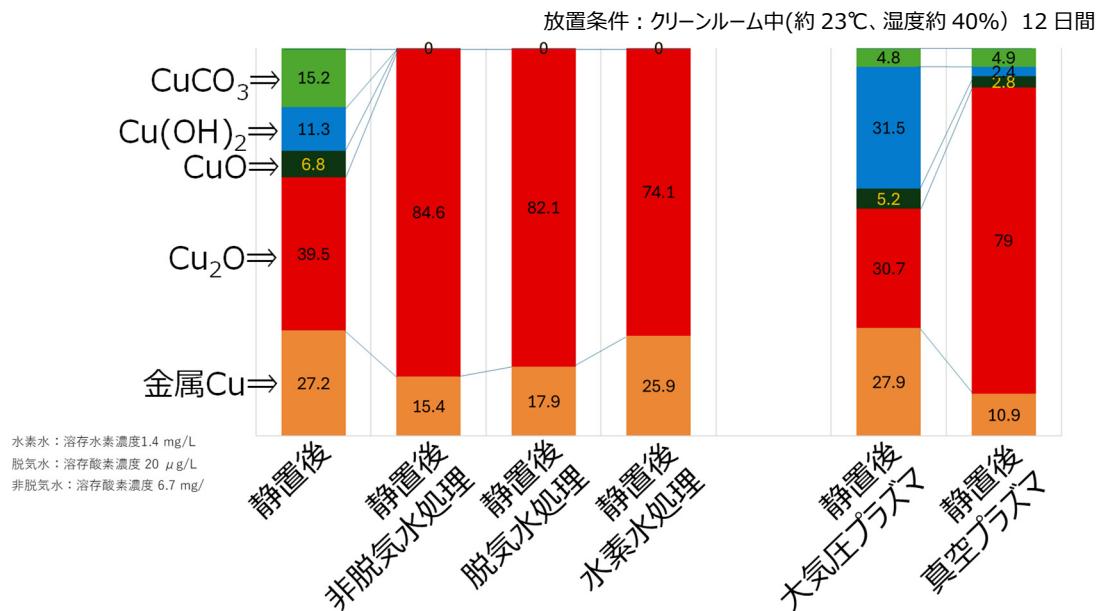


図12 水素水浸漬およびプラズマ処理の影響解析結果(グラフ中の数字は%)

3-2. 半導体チップ非接触ハンドリング技術の開発

3-2-1. 超音波非接触ハンドリング技術の概要

図13は、本事業で開発した超音波非接触ハンドリング治具の説明図である^{[6][7]}。振動板が振動することで、Siチップに浮上力が発生する。このとき、Siチップには水平方向の把持力が働き、この力により半導体チップのセルフアライメント(自動位置決め)が可能となる。このセルフアライメントにより、従来技術のペルヌーイチャックで必要であったチップ外形のガイドが不要になり、完全非接触のチップハンドリングが可能となった。

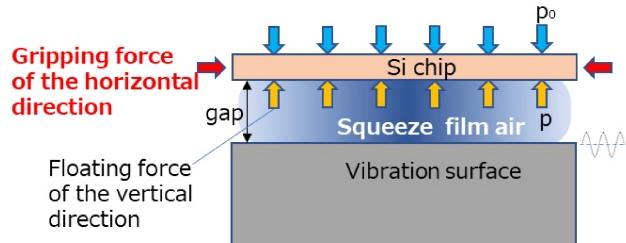


図13 超音波非接触ハンドリング治具の説明図

図14は、治具の小型化設計の説明図である。初期の治具は、ランジュバン型振動子を用いたもので、超音波発振子を含む高さが60mmあり、ボンダへの取付けが困難であった。そこで本事業では、ユニモルフ型の圧電素子を治具に一体化設計することで高さ15mmを実現した。

写真11は、開発した小型超音波非接触ハンドリング治具の外観である。主要部品は土台、振動板、圧電素子である。振動板は4端で土台に固定している。振動板上にはチップを吸引する

ための穴が形成されている。外観写真では見えないが、振動板の裏面には2個の圧電素子が接合されている。また、振動板裏面の中央部には、吸引チューブを取り付けている。

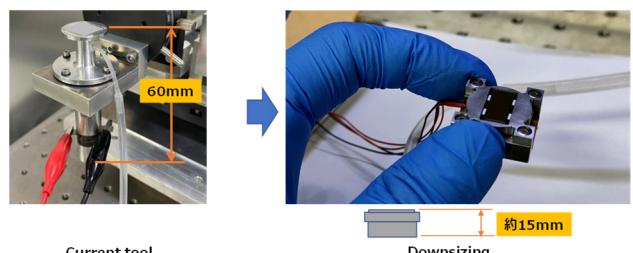


図14 治具の小型化の説明図

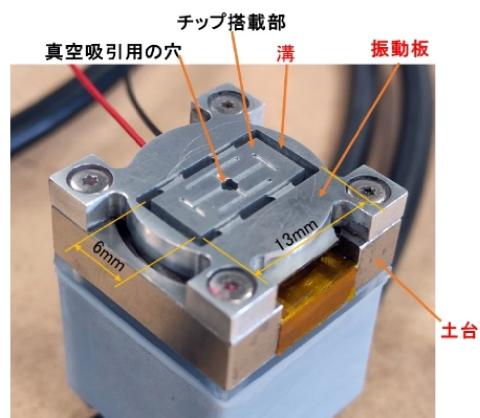


写真11 超音波非接触ハンドリング治具の外観

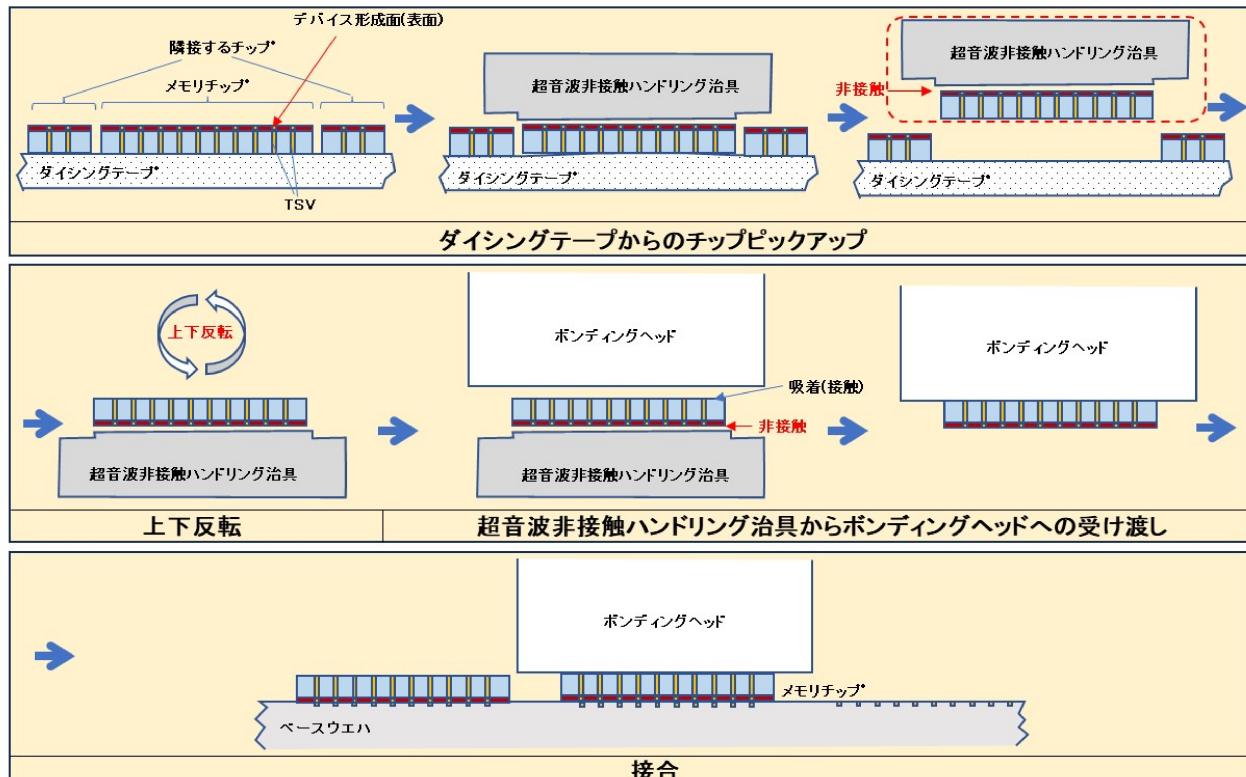


図15 チップ搬送の説明図

図15はチップ搬送の説明図である。

最初に非接触ハンドリング治具でダイシングテープからチップを非接触でピックアップする。その後、非接触ハンドリング治具に非接触でチップを持ちそのまま上下反転する。そして、非接触ハンドリング治具に非接触でチップを持ちそのままボンディングヘッドにチップを受け渡す。最後に、ボンディングヘッドでベースウェハにチップを接合する。

このように、ダイシングテープからチップをピックアップ後、接合するまでの間、チップのデバイス形成面は治具に一切接触しない。

3-2-2. チップの浮上状態確認

写真12は、Siチップを超音波非接触ハンドリング治具に把持させ、チップをセルフアライメントした時の写真である。

チップは浮上した状態で、自己整合的に治具の中央部に位置決めされる。



写真12 Siチップの把持状態

写真13は、Siチップ浮上観察の一例である。Siチップの厚さは50μmである。超音波出力と吸引を適切に調整することで、浮上したチップを安定して静止させることができる。

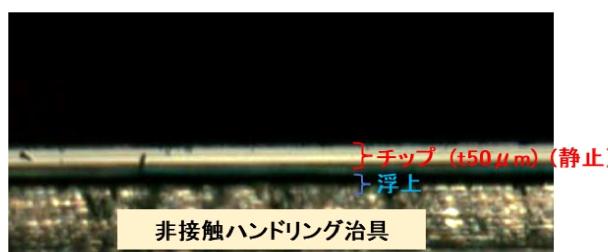


写真13 チップ浮上状態

3-2-3. 振動形態の最適化

超音波非接触ハンドリング治具の形状最適化は振動状態のシミュレーションによって実施した。図16は、振動板の溝有無による振動状態の比較シミュレーションである。具体的には、振動板のチップ把持領域(6mm × 13mm)の外側部分に溝を設けることで、超音波振動時にチップ把持領域が反ることなく上下動できるようにしている。

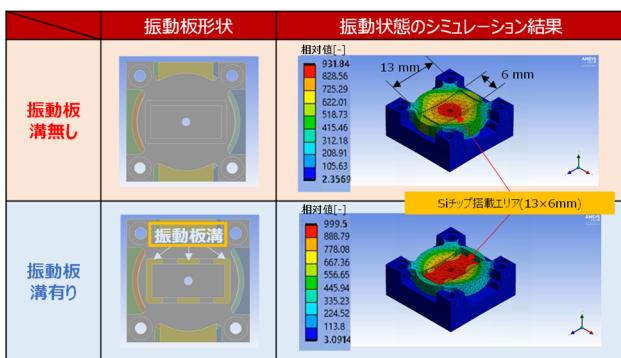


図16 振動板の溝有無による振動状態の比較シミュレーション

3-2-4. 接合部ボイド低減の効果確認

図17は、接触型の治具と本事業の非接触ハンドリング治具で、チップ接合後のボイドを SAT(Scanning Acoustic Tomograph: 超音波映像装置)観察で比較した評価結果である。

本事業の超音波非接触ハンドリング治具を用いることで接合部ボイドの低減を達成した。

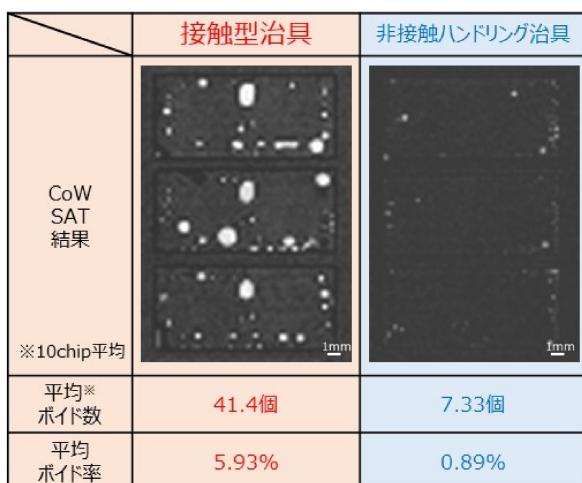


図17 接触ツール／非接触搬送ツールボイド比較

3-3. 異物検査技術の開発

3-3-1. 半導体チップ表面異物検査の現状の課題と課題解決のためのコンセプト

半導体チップの表面異物検査における課題は、以下の2点である。

1. Si屑などの不透明異物や、樹脂などの透明異物の付着が想定される。
2. 接合後に異物の数十倍のサイズであるボイドが発生するため、サブミクロンサイズの微小異物も検知する必要がある。これに対し、従来の半導体前工程で使用されている光散乱式パーティクル検査装置では、透明異物の検出が困難であるという課題があった。

そこで本事業では、これらの課題を解決するため、生物分野で活用されている QPM(Quantitative Phase Microscopy: 定量位相顕微鏡)の応用を進めた^[8]。

図18は、QPMの観察原理を示すイメージ図である。QPMは、試料に単色光を照射し、反射光の位相差を高さ情報を変換して画像化する。

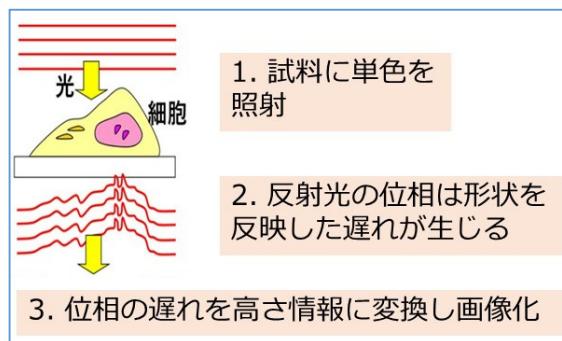


図18 QPM の観察原理

表3は、QPMと他の検査装置の適用可否を比較した一覧である。QPMは、垂直分解能、広範囲観察、透明異物検出などの点で他の検査装置に比べて優れていると考え、本事業での採用を決定した。

表3 QPM と他の検査装置の適用可否

	QPM	光散乱式パーティクル検査装置	レーザー顕微鏡	金属顕微鏡
水平分解能	可 サブミクロンレベル	可 サブミクロンレベル	可 サブミクロンレベル	不可 ミクロンレベル
垂直分解能	良 サブナノレベル	不可 Z方向の測長は困難	可 ナノレベル	不可
広範囲観察	良 1shotで数ミリ四方を撮像可能	可 Φ300mmウエハを検査可能	可 XY走査が必要であり、撮像に時間が必要	良 1shotで数ミリ四方を撮像可能
不透明異物検出 (Si屑など)	良	不可	良	不可
透明異物検出 (樹脂など)	良	不可	良	不可

写真14は、QPM 検査装置の試作機の外観である。

検査装置は、 $\phi 400\text{mm}$ のダイシングリングのサンプルおよび $\phi 300\text{mm}$ ウェハの検査に対応している。

3-3-2. 検出能力限界の検証

図19は、QPM 異物検査装置試作機により標準パーティクル(大きな保証された標準粒子)を観察した結果である。

標準パーティクルは、ウェハ上に不透明な Si 粒子と、透明な SiO_2 粒子が搭載されている。

観察の結果、QPM は不透明・透明を問わず、 $\phi 0.2\mu\text{m}$ 以上の異物を検出可能であることが確認された。



写真14 試作機外観

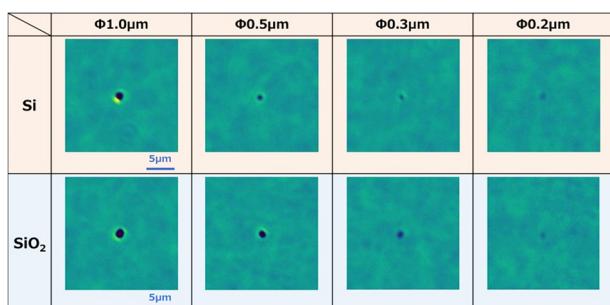


図19 QPM 異物検査装置試作機での標準パーティクル観察結果

3-4. 接合評価

3-4-1. 巻き込みボイド対策

COW ダイレクト接合は、フリップチップボンダを用いてベースウェハ上にチップを搭載する方式である。このとき、ボンダのボンディングヘッド先端に取り付けたコレットでチップを把持し、チップをウェハに押し付ける。チップとベースウェハ間に空気が残留すると、巻き込みボイド(空隙)が発生する。

図20は、ボンディングコレットの形状と巻き込みボイドの発生状況を比較した一例である。

実験では、従来型の“平コレット”と、開発した“外周支持コレット”を比較した。

平コレットはチップサイズに合わせて製作し、表面は平坦で、真空吸引穴を9個形成している。

外周支持コレットもチップ外形に合わせて製作し、チップ外周部のみを支持する構造とし、中央部は凹形状としてチップと接触しないように設計した。

COW 接合後のボイド比較では、平コレットを用いた場合は、空気の巻き込みによる大きなボイドが多発した。一方、外周支持コレットでは、空気の巻き込みによる大きなボイドはほとんど見られなかった。

コレット形状が巻き込みボイドの発生に影響を与える要因は、チップを吸着した際のチップ反り形状に起因すると考えられ、現在も解析を継続している。



図20 ボンディングコレット形状と巻き込みボイドの比較

3-4-2. COW 電極の接合

開発した異物除去洗浄および前処理プロセスを適用したサンプルを用いて、COW 電極の接合を評価した。

写真15は、接合前処理として真空プラズマおよび水素水洗浄を施した電気評価用デバイスの COW 接合品における電極部の断面観察例である。Cu-Cu 電極の接合が確認された。

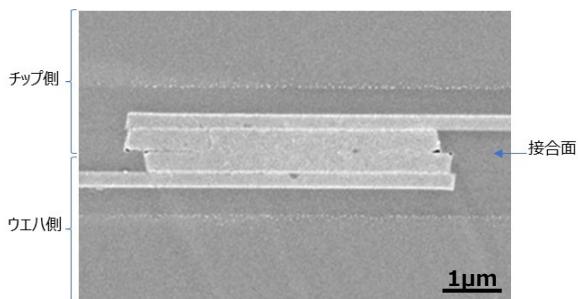


写真15 COW 接合品の電極部断面観察例

4

結言

ポスト5G社会の先端半導体に用いられるCOWダイレクト接合を早期に確立することを目的として、要素技術の開発を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (1)半導体チップへの異物付着防止を目的として、超音波非接触ハンドリング技術を開発した。ボンダに搭載可能な超小型ツールを設計・試作することで、厚さ50μm以下チップの完全非接触搬送を実現した。
- (2)水素水を用いた異物除去洗浄装置および洗浄プロセスを開発した。ダイシングに起因する異物除去に加え、乾燥残りへの対策を講じることで、異物10個/チップ以下(異物サイズ0.3μm)を達成した。
- (3)QPM(定量位相顕微鏡)を用いた異物検査装置を開発した。これにより、サブミクロンサイズの透明異物および不透明異物の検出が可能となり、異物除去洗浄プロセスの改善に貢献した。
- (4)ボンディングツールの改良および異物低減の取り組みにより、接合部のボイド低減を達成した。また、COW実装後のCu-Cuダイレクト接合を実現した。

以上の開発成果により、COWダイレクト接合技術の実用化に貢献した。

なお、本開発完了後には、半導体メーカーより試作評価の依頼を受けており、今後は実デバイスに近いサンプルを用いた評価を進める計画である。

■謝辞

本成果は、NEDO の助成事業“ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業”により得られたものである。

研究にあたっては、産業技術総合研究所の菊地克弥様、高橋健司様、島本晴夫様には、ダイレクト接合技術に関するご指導を賜った。また、東京理科大学の宮武教授には、超音波非接触ハンドリング技術に関するご指導をいただいた。

水素水を活用した異物除去洗浄プロセスの開発においては、栗田工業株式会社の井田純一様にご協力をいただいた。

本事業は、多くの方々のご支援とご協力のもとに実施・完遂することができた。ここに厚く御礼を申し上げる。

なお、ヤマハロボティクス株式会社は、本事業の共同研究先である産業技術総合研究所および東京理科大学と CEATEC AWARD 2025にてイノベーション部門賞を受賞致しました。

■参考文献

- [1] 須賀唯知：“ものづくりのための接合技術”，精密工学会誌，Vol. 79, No. 8, pp. 705-709, 2013
- [2] 仁村将次：“積層型機能性デバイスに向けたハイブリッド接合技術に関する研究”，早稲田大学，博士論文, 2016
- [3] 李瑾, 菊地広, 永田憲雅, 井田純一, 宮崎洋一：“水素水とワイピングを用いた半導体チップの精密洗浄技術”，エレクトロニクス実装学会誌, 24巻, 3号, pp. 268-276, 2021
- [4] 大見忠弘：“半導体製造プロセスにおけるクリーン化技術”，表面技術, Vol. 50, No. 10, pp. 848-854, 1999
- [5] 森田博志：“機能水を用いたシリコン基板の新しい洗浄技術に関する研究”，東北大学，博士論文, 2011
- [6] 菱沼隼, 宮武正明, 菊地広, 戸張優太：“半導体チップ搬送における超音波スクイーズ効果を利用した非接触ハンドリング技術開発”，エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 38巻, pp. 13A5-1, 2024
- [7] 代田雄高, 吉本成香, 宮武正明：“超音波スクイーズ効果を利用した半導体ウェハ用非接触チャックに関する研究”，精密工学会学術講演会講演論文集, 2006A巻, pp. 945-946, 2006
- [8] 戸張優太, 菊地広, 菱沼隼, 李瑾：“チップオンウェハダイレクト接合技術の開発”，第36回マイクロエレクトロニクス研究会Proceeding, Nov. 2024

■著者



菊地 広
Hiroshi Kikuchi
ヤマハロボティクス株式会社
技術研究本部
先端技術開発部



菱沼 隼
Hayato Hishinuma
ヤマハロボティクス株式会社
技術研究本部
先端技術開発部



李 瑾
Jin Li
ヤマハロボティクス株式会社
技術研究本部
先端技術開発部



永田 憲雅
Norimasa Nagata
ヤマハロボティクス株式会社
技術顧問



尾川 謙一
Kenichi Ogawa
ヤマハロボティクス株式会社
技術研究本部
先端技術開発部