

平成 2 9 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「3次元 L S I ウェハ薄化を実現する革新的接合工法の開発」

研究開発成果等報告書

平成 3 0 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

内容

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	2
1-3-1 【1】LSI段差・配置パターン適応制御貼合システムの構築	2
1-3-2 【2】接着剤膜厚均一化を実現する回転塗布システムの高度化	3
1-3-3 【3】厚み均一化、高タクト化を実現する加圧システムの高度化	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 【1】LSI段差・配置パターン適応制御貼合システムの構築	5
2-1-1 【1-1】マイクロバンプ段差、配置に応じた塗布膜厚み解析	5
2-1-2 【1-2】マイクロバンプ段差、配置に応じた貼合後厚み解析	11
2-1-3 【1-3】接着剤条件（温度による粘度変化）に応じた	13
2-2-4 【1-4】解析+膜厚実測定による補正方式確立と品種切り替え時間の短縮	14
2-2 【2】接着剤膜厚均一化を実現する回転塗布システムの高度化	15
2-2-1 【2-1】エリア別膜厚制御方式確立	15
2-2-2 【2-2】接着剤塗布均一化	15
2-3 【3】厚み均一化、高タクト化を実現する加圧システムの高度化	16
2-3-1 【3-1】エリア加圧による貼合後ワーク厚均一化	16
2-3-2 【3-2】加圧工程タクト低減	17
2-3-3 【3-3】貼り合わせ位置精度向上	17
2-4 本事業にかかわる知的財産権等について	18
最終章 全体総括	19
3-1 成果概要	19
3-2 事業の成果に関する事業化展開について	19

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

LSI 微細化による高集積化は信号の遅延問題等により限界にあり、これに変わり、LSI の積層による高集積化（3次元LSI）が進展している。3次元LSIでは、多数のLSIを積層し、更に、動作速度向上・低電力化を図るため高精度な研磨により $775\mu\text{m} \Rightarrow 20\mu\text{m}$ の薄化を行い、LSI間を繋ぐ貫通電極の抵抗値、容量値を低減する必要がある。また、カメラ用のCMOSイメージセンサでは、小型化と高性能化（高感度化）を両立するため、裏面照射型のセンサが主流になっている。このセンサでは、シリコンウェハにフォトディテクタを形成した後、フォトディテクタ以外のシリコンを高精度な研磨により除去する必要がある。このような研磨は、LSIに接着剤を均一に塗布し、真空下で支持体（シリコンウェハやガラス）と加熱・加圧により接合した後、研磨による薄化、再配線形成処理、支持体の剥離を行い、積層して3次元LSIとなる。裏面照射型センサも同じ工程である。

LSIメーカーでは更なる競争力強化のため、各LSIパッケージを、実装プリント基板に直接実装する方法から、シリコン（Si）インターポーザ上に微細配線を形成し、その上に、LSIチップを実装することで、更なる低消費電力・速度向上・小型化を実現する2.5次元化を推進している。この方法は、CPU・メモリ・ロジック・アナログ処理を「同一チップ内に集積する方法」、「各チップを全て積層する方法」で課題となる膨大なマスクコストや、不良率増によるコストの課題を解決するものであり、現在、極めて活発な開発が行われ、製品化が開始されている。

また、LSI以外にも、ハイブリッドカーや電気自動車で使用されるパワーデバイスや、スマートフォン内に搭載される電子部品に関しても、ウェハの薄化を行うことによりデバイスの性能向上やコスト低減につながり、薄化プロセスが多くのデバイスの製造プロセスに適用されてきており、薄化技術が広く求められる状況にある。

(2) 研究開発の目的

Siインターポーザは、LSIチップとパッケージ間をつなぐ多数の配線（LSI同様の配線形成プロセスで製膜される）が必要であり、消費電力低減・速度向上のため、LSIメーカーでは、積層LSI同様 $20\mu\text{m}$ の薄型化を進めている。しかし、支持体と接合する面の段差が、

$3\mu\text{m}$ （メモリ等の貫通電極） $\Rightarrow 20\mu\text{m}$ （Siインターポーザのマイクロバンプ）となり、タツモ(株)での支持体接合後の厚みバラツキ（支持体、Si各 $1\mu\text{m}$ のバラツキ含む）も

$3\mu\text{m} \Rightarrow 8\mu\text{m}$ （接着剤の平均厚みは約 $40\mu\text{m}$ ）

と増大している。このため、LSIメーカーでは約 $30\mu\text{m}$ までの研磨しか実施できず、段差 $20\mu\text{m}$ のマイクロバンプにおいても、従来同等 $3\mu\text{m}$ 以内の厚みバラツキを要望されている。

これらに加え、メモリのみの積層、貫通電極化による積層が進むCMOSセンサ等でもSiインターポーザ化による小型化・性能向上が進められており、更に、積層化されるLSIもフラッシュメモリ、ロジック等多岐に渡っている。このため、品種によって

- ・電極の有無、電極の段差が大きく異なる（ $0 \sim 30\mu\text{m}$ ）
- ・貫通電極やマイクロバンプの配置が異なる *特にマイクロバンプの配置は均一性に影響
- ・粘性や硬化温度の異なる多種・多様な接着材（配線形成における多様なエッチング液、アニール等の熱処理でも高い接着性保持が必要）

を各々最適化することが必要である。

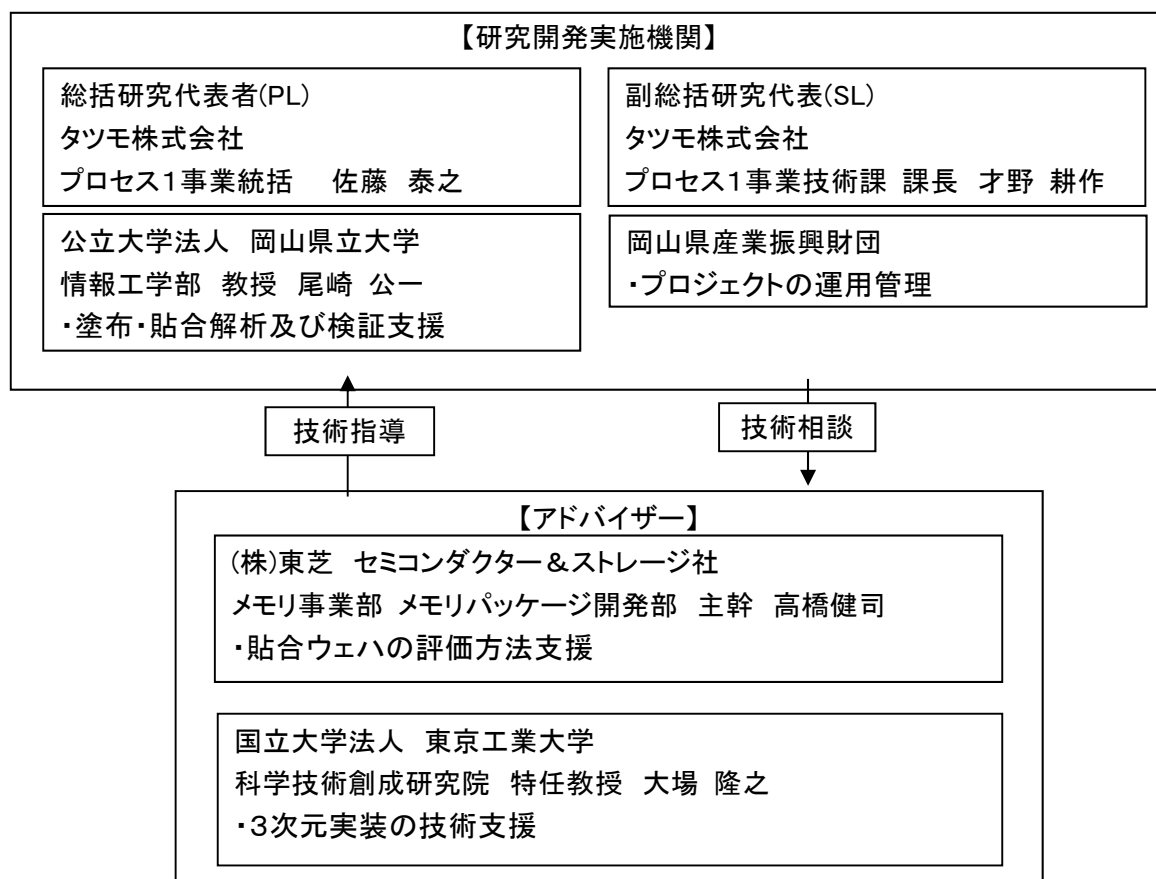
以上を受けて、本研究では、1台の装置内で、これら多種多様な対応を、品種切り替えロス無に、従来同等の接着材厚みバラツキに抑え、低コスト化を図ることを目的としている。現在、これらの性能は、世界中の競合する接合装置メーカーでも実現できておらず、これらにいち早く対応可能な技術高度化を図り、事業拡大、国内半導体産業への貢献を実現する。

(3) 研究開発の目標

平成30年3月31日までに、品種により配線位置の異なるマイクロバンプ段差や、粘性・硬化温度の異なる接着剤においても下記の性能を達成できるツール(ハードウェアとソフトウェア、プロセス条件等を統合したシステム)を実現することにより、川下企業の要望に応える仮接合装置の事業化を広く展開し、事業拡大を実現する。

- 精度の高い薄型化を実現する $3\mu\text{m}$ 以下の接合均一性(接着剤部は $1\mu\text{m}$ 以下)
- 多層化においても高い生産性を実現する 2分/枚の高タクト化
- 切り替え時間ロスの $1/6$ 化(3時間 $\Rightarrow$ 0.5時間以内)
- 貼り合わせ位置精度: $\pm 100\mu\text{m} \Rightarrow \pm 30\mu\text{m}$

1-2 研究体制



1-3 成果概要

1-3-1 【1】LSI段差・配置パターン適応制御貼合システムの構築

マイクロバンプ段差、配置に応じた塗布膜厚み解析において、粘性の異なる2種類の接着材

の選定を行い、塗布に関し必要とされる材料の詳細データを取得し、平坦なウェハ解析シミュレーションモデルをもとにバンプ付ウェハへの拡張を図った。バンプ付ウェハへの塗布を実施し、シミュレーションにより求めた結果との一致を確認した。

マイクロバンプ段差、配置に応じた貼合後厚み解析において、平坦ウェハに関する解析シミュレーションモデルをバンプ付ウェハへの拡張を図り、プログラムの開発・動作検証を行った。また、シミュレーションに必要とされる実材料の詳細データを取得し解析に反映させると共に、本事業で製作した自動機を使用し貼合処理を行い、シミュレーションにより求めた結果との一致を確認した。

接着剤条件に応じた厚み解析を行うために、温度を変えることによる接着剤の粘度変化や体積変化等を測定した上で貼合可能な温度域を求め、貼合時の温度や貼合時間の影響を確認した。

解析＋膜厚実測定による補正方式の確立を図るために、シミュレーションと実塗布・貼合との一致の確認を元に、貼合装置における処理レシピの基本となるレシピテーブルを構築し、それを使っての装置の動作確認を行った。

【1－1】マイクロバンプ段差、配置に応じた塗布膜厚み解析

[タツモ株式会社、岡山県立大学]

- ・ 塗布液回転拡大における、解析モデルと実塗布実験動画との比較にて一致を確認完
- ・ 膜厚調整における回転数・回転時間及び粘度の膜厚に対する変化が一致することを確認完

【1－2】マイクロバンプ段差、配置に応じた貼合後厚み解析

[タツモ株式会社]

- ・ 接着剤塗布膜のエッジ部盛り上がりは貼合後の TTV に大きな影響を与えないことを確認
- ・ 解析モデルを使った結果と貼合実験結果とは、高い一致率であることを確認

【1－3】接着剤条件（温度による粘度変化）に応じた塗布・貼合後厚み解析

[タツモ株式会社]

- ・ 平坦ウェハを使って、貼合温度による厚さ均一性への影響を確認
- ・ メーカー推奨の貼合温度・貼合時間が最適であることを確認完

【1－4】解析＋膜厚実測定による補正方式確立と品種切替時間の短縮

[タツモ株式会社]

- ・ 材料測定データ及び処理膜厚から塗布回転数と処理時間の適用可能条件を計算可能であることを確認完
- ・ バンプによる塗布膜厚分布の影響を解析可能であることから、処理条件の変更（品種切替）時の対応時間を短縮可能であることを確認

1－3－2 【2】接着剤膜厚均一化を実現する回転塗布システムの高度化

エリア別膜厚制御方式確立において塗布と貼合の両面からの制御を検討し、本事業にて開発の貼合装置において、塗布後の膜厚影響を強く受けることを確認した。そこで塗布時の膜厚のエリア別制御方式を検討し検証した。気流制御による検証を行い目的とする膜厚制御に対す効果は小さいことを確認した。

また、バンプウェハへの塗布膜厚の均一化を進めるに当たり、バンプの直径・高さ・ピッチの異なるウェハを準備し、塗布と膜厚分布を測定し均一性向上要因を確認するとともに必要な膜厚均一性を確認した。

【2-1】エリア別膜厚制御方式確立

[タツモ株式会社]

- ・ 気流の流れによるエリア別膜厚制御を目的とした検証完了
- ・ 気流の変化による膜厚均一性に与える影響は小さいことを確認

【2-2】接着剤塗布膜均一化

[タツモ株式会社]

- ・ バンプ付きウェハ塗布において、膜厚の均一性に強く影響を与える中央部の盛り上がり量が2μm以下であることを確認完了

1-3-3 【3】厚み均一化、高タクト化を実現する加圧システムの高度化

エリア加圧による貼合後ワーク厚均一化について、貼合モジュールの製作を行い、個々の動作及び性能の確認を行った。接着剤塗布済み平坦ウェハやバンプ付きウェハを使って、実際の生産に使用可能である貼合の基本性能を確認した。実デバイス形状に合わせたバンプ付ウェハを使い貼合後の厚さ均一性が目標を達成していることを確認した。

生産性に大きく影響する貼合工程のタクト低減について、自動搬送機能付き貼合装置を製作すると共に、加熱・冷却モジュールを追加し、処理フローの最適化やプロセスの最適化を行い、処理時間の更なる短縮を実現した。

生産装置として必須要求事項である貼り合せ精度の向上について、新規機構を開発し要求精度を達成していることを実処理に即し連続搬送を行い確認した。

【3-1】エリア加圧による貼合後ワーク厚均一化

[タツモ株式会社]

- ・ チャンバ内真空及びプレート裏面からの加圧を使つての自動貼合を確認完了
- ・ 各種バンプパターン（Wide I/O パターン含む）の処理を行い、一部のパターンにおいて厚さ均一性3μmの達成を確認

【3-2】加圧工程タクト低減

[タツモ株式会社]

- ・ 自動搬送可能な貼合システムの構築完了
- ・ 貼合前処理の追加により昇温・冷却時間を大幅に短縮できるフローを構築完了
- ・ 貼合時間を除いてタクト時間140秒になることを実機にて確認完了

【3-3】貼り合わせ位置精度向上

[タツモ株式会社]

- ・ 自動搬送により、貼り合せ精度±30μmを確認。

1-4 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 3F

担当者：ものづくり支援部 研究開発支援課 次長 入江 栄治

連絡先：TEL：086-286-9651 FAX：086-286-9676

E-mail：bay@optic.or.jp

PL企業：タツモ株式会社

所在地：〒715-8603 岡山県井原市木之町 6186

担当者：プロセス1事業 事業統括 佐藤 泰之

連絡先：TEL：0866-62-2776 FAX：0866-62-0948

E-mail：yasuyuki.sato@tazmo.co.jp

第2章 本論

2-1 【1】LSI 段差・配置パターン適応制御貼合システムの構築

LSI 接着面の凸凹や接着材条件によらず、厚さを均一にする為には、回転塗布と加圧加熱貼合時の接着剤の挙動を解析し、処理条件の変更や機構部の改良に反映させる必要がある。本件では、接着回転塗布及び加圧・貼合に対してそれぞれ解析を行い、処理結果からのデータと解析結果のデータとを統合し、LSI 接着面の段差や配線パターンに適応し、厚さ $3\mu\text{m}$ 以内を安定して実現できるシステムの構築を行った。

2-1-1 【1-1】マイクロバンプ段差、配置に応じた塗布膜厚み解析

接着材の回転塗布に於いては、接着材の物性、デバイスウェハ表面の微細形状と温湿度などの環境条件、遠心力などの外力印可条件、等々が複雑に関与する。仮接合に使用する接着剤の物性を取得し、その結果を解析に導入し実際のデータと比較した。

2種類の接着剤と数種類のバンプパターン付きウェハに対して、実際に塗布したデータとシミュレーションとの比較検証を行い一致することを確認した。

(1) 実液を使った回転塗布に関する接着剤物性の取得について

接着剤の物性の取得に関しては、材料メーカーから提供される資料から得られるものもあるが、開示されない物性も多い。回転塗布において必要とされる接着剤の物性については、後に示されている解析方法を検討・検証する過程において、必要とされたパラメータも含まれている。

塗布結果や広がりに影響する材料の特性データとしては、せん断粘度、固形分濃度、表面張力、接触角、密度等のパラメータが必要となる。同一目的で使用する2種類の特性の異なる材料を用意し、其々の材料特性データを取得した。

接着剤1及び接着剤2の材料と特性となる物性値は以下の数値を使用している。せん断粘度や固形分濃度等大きな違いがみられた。個々のパラメータの違いがどの程度塗布に影響を与えるかについては、後述のシミュレーションにおける計算式に確認することができる。

接着剤1・2 物性まとめ

物性項目	接着剤 1	接着剤 2
せん断粘度 (Pa・s)	4.3	1.15
固形分濃度 (wt%)	30.4	43.5
表面張力 (mN/m)	30.38	31.04
接触角 (°)	37.43	31.84
密度 (g/cm ³)	0.95	0.86

(2) 回転塗布におけるシミュレーション解析

シミュレーションの解析を進める過程において、塗布に影響する材料の物性を抽出し実液使ってそれらを測定した。当初、接着剤の挙動を細かく計算する3Dモデルでの解析を検討したが、生産装置に本解析手法を搭載する必要がありその演算速度に制限がることと、膜厚とウェハ直径との寸法差が極端に異なることから、簡易モデルでの解析に方向を修正し検証を進めた。

前項で求めた接着剤の各種パラメータやウェハの表面形状情報により簡略モデルを構築し、そ

の解析結果が実塗布のデータと高いレベルで一致することを確認した。

(2-1) ペアウェハにおける接着剤広がり過程の解析

本節では、構築したペア（平滑）ウェハ上における接着剤広がり過程の解析モデルと実験結果との比較により、提案したモデルの妥当性を検証する。解析モデルについて簡単に説明し、ウェハを使った塗布結果との比較検証をおこなった。

(i) ペアウェハに対する解析モデル

解析モデルについて簡単に説明する。簡易化のため、解析に際しては以下の条件を仮定した。

- ・ 接着剤はニュートン流体と見なして良い
- ・ 流れは軸対称かつ層流である
- ・ 流れ方向（半径方向）に圧力分布はない
- ・ 接着剤表面（周囲空気との界面）でのせん断応力は無視できる
- ・ シリコンウェハ法線方向の速度分布による粘性力と回転による遠心力が支配的である

以上の仮定を適用して円筒座標系に関するNS方程式を簡略化し、解析することで次式を得る。

$$r^4 = r_0^4 + \frac{4\rho\omega^2 V_0^2}{3\pi^2 \mu} t \dots\dots (1)$$

ここに、 ρ は密度、 r はシリコンウェハ中心からの距離（半径）、初期半径を r_0 、 ω は角速度、 μ は接着剤の粘性係数、 V_0 は接着剤ディスペンス体積である。

r^4 が時間 t の一次関数として表される。上式の妥当性を確認するには、種々の条件について実験的に r と t の関係を求める必要がある。

(ii) ペアウェハに関する実験

スピコート装置の上方から高速度ビデオカメラにより接着剤液膜の広がりを撮影した。図2に一例を示す。接着剤液膜のエッジ部で照明が反射したことによる2つの輝点の位置を、100フレーム毎（250fpsで撮影のため0.4s間隔）に計測し、接着剤液膜半径の時間変化を調査した。その際、接着剤滴下位置からウェハ端部までの距離が既知であることを利用し、画像データから実寸へと換算した。

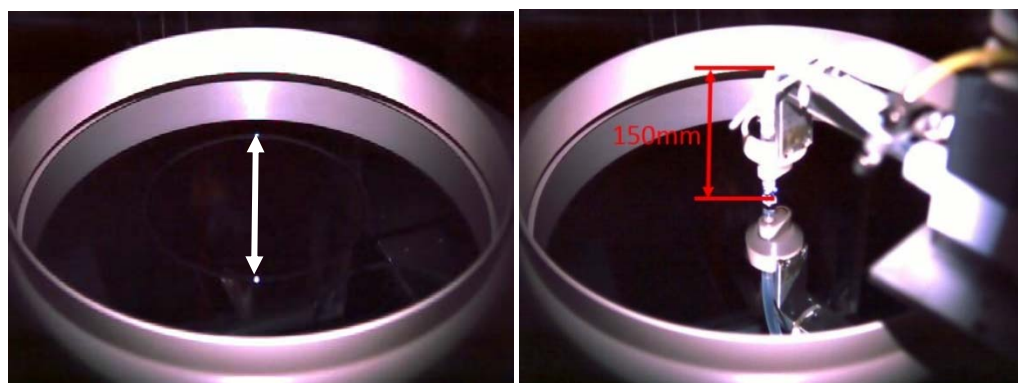


図 1 スピコート実験の撮影結果例

接着剤広がり半径の測定結果例を図 3 左図に示す。実験条件は、接着剤滴下量 $V_0=15\text{ml}$ 、低速回転 300rpm、40s、高速回転 1100rpm、13s である。撮影開始から約 49.5 秒までは低速回転、それ以降は高速回転で有り、『接着剤広がり半径の時間増加割合は、低速回転で小さく、高速回転で大きくなる。』また、前述の式(11)に従い、半径の 4 乗と時間の関係でプロットしたものが図 3 右図である。『半径の 4 乗は、それぞれの回転数の領域において、時間に対してほぼ直線的に変化している。』以下、本文では、低回転数領域での勾配を k_1 、高回転数領域での勾配を k_2 と呼ぶこととし、これらの値は最小自乗法による近似直線の勾配から定めた。

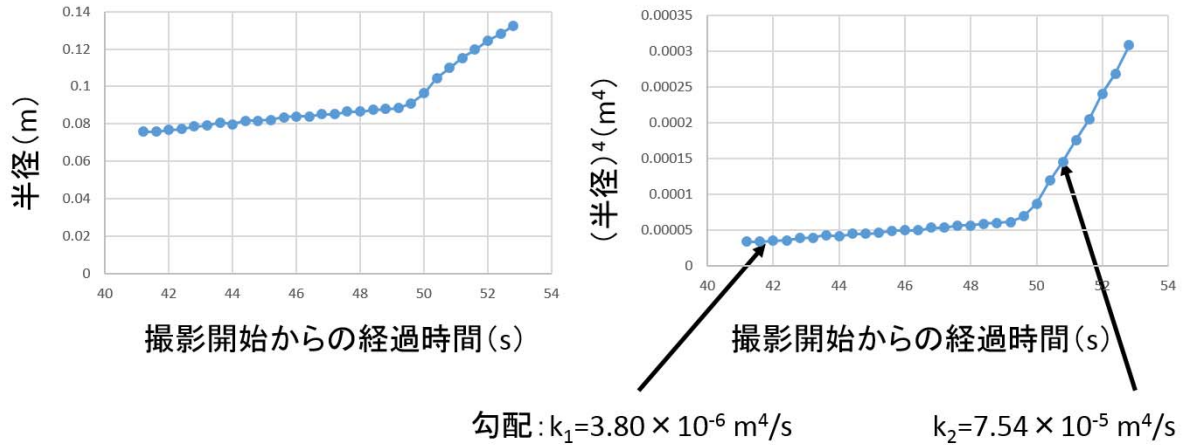


図 2 接着剤広がり半径の測定結果例
(滴下量 $V_0=15\text{ml}$ 、低速 300rpm、40s、高速 1100rpm、13s)

以上の方法により計算した半径と実験結果との比較を図 9 に示す。いずれの条件についても、計算値は実験値に良く一致しており、全データに対する標準偏差は 3.30%であった。

実際のスピンコートでは接着剤膜厚さの制御が必要なので、式(16)から膜厚 δ を求める方法について述べる。接着剤膜を円柱状と見なせば、体積一定条件より $V_0=\pi r^2 \delta$ なので、膜厚 δ は次式で求められる。

(2-2) バンプ付きウェハにおける接着剤広がり過程の解析

(i) マイクロバンプ付きウェハに対する解析モデル

図 1 に示すように、直径 d 、高さ h の円柱がピッチ p で基盤目配列されているマイクロバンプ付きウェハにおいて、マイクロバンプ部を浸透性 K 、空隙率 ε の多孔質層と見なし、多孔質層内の流れを粘性力を考慮した Brinkman モデルで評価すれば、膜厚の減少速度は次式で表すことが出来る。

$$-\frac{d\delta}{dt} = \frac{2\rho\omega^2(H+\varepsilon h)}{3\mu(H+h)} \left\{ H^3 + 3K\varepsilon h + \frac{\sqrt{K}(\alpha^2 - 1)(H^2 - 3K\varepsilon) + K(\alpha - 1)^2(3 + \varepsilon)H}{\alpha^2 + 1} \right\} \dots (2)$$

ここに、 $\alpha = \exp(h/\sqrt{K})$ 、 $H = \delta - h$ であり、浸透性 K は粒子充填層に関する次式を用いた。

$$K = \frac{d_e^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \dots \dots (3)$$

d_e は等価直径であり、円柱形バンプの体積 V と表面積 S （側面のみ考慮）により、 $d_e = 6V/S = 3d/2$ と評価した。また空隙率 ε は、ピッチ p より $\varepsilon = 1 - \pi d^2 / (4p^2)$ とした。

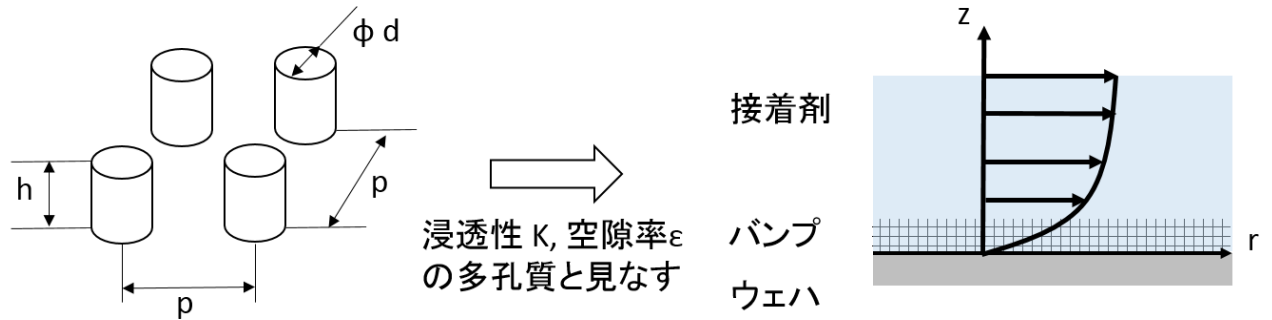


図 3 マイクロバンプ付きウェハのモデル化

(ii) マイクロバンプ付きウェハに対する数値解の導出と実験との比較

本節では、以下の 4 種類のバンプについて数値解の導出と実験との比較を試みる。なお、Case4 ($d=30\mu\text{m}$, $h=30\mu\text{m}$, $p=60\mu\text{m}$) については、数値計算を行ったが、このテーマでは対象としなかった。

- Case1 : $d=30\mu\text{m}$, $h=15\mu\text{m}$, $p=60\mu\text{m}$
- Case2 : $d=30\mu\text{m}$, $h=15\mu\text{m}$, $p=100\mu\text{m}$
- Case3 : $d=100\mu\text{m}$, $h=15\mu\text{m}$, $p=200\mu\text{m}$
- Case5 : $d=20\mu\text{m}$, $h=12\mu\text{m}$, $p=40\mu\text{m}$

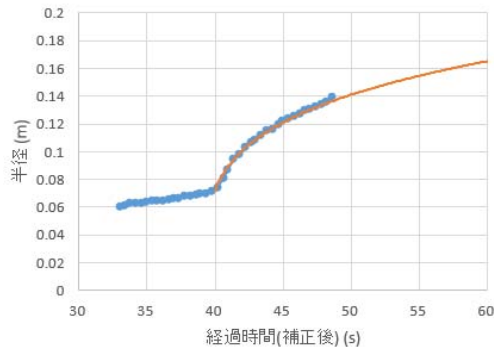
塗布条件は、表 1 中に赤字で示す 5 条件である。実験においては、スピコート中の接着剤液膜の状態を 250fps で撮影した。そのハイスピードビデオ映像を 100 フレーム毎 (0.4 秒間隔) で画像解析し、接着剤膜のエッジ位置の時間変化を計測した。

図 4 は、Case1 および Case2 のピッチの異なるバンプに対して、条件①で塗布した場合の接着剤膜半径の時間変化の実験結果と計算結果を比較したものである。なお、解析では、実験結果に基づき、回転数を 300 rpm から 1100 rpm へと切り替える 40s における半径を 0.072m とし、その後の半径変化について検討している。図 4 において、Case1, Case2 のいずれのバンプ形状についても実験結果と計算結果は良く一致している。

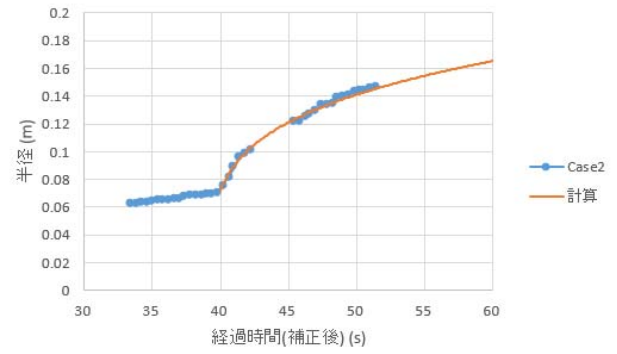
図 3 は、Case 1, Case3, Case5 のバンプに各種塗布条件を適用した場合について、実験結果と計算結果を比較したものである。いずれのバンプおよび塗布条件についても、実験結果と計算結果は良く一致している。

表 1 塗布条件

条件	塗布量	塗広げ回転数	塗広げ時間	減膜回転数	減膜時間
条件 1	15ml	300rpm	40sec	1100rpm	13sec
条件 5		400rpm			
条件 7			50sec		
条件 9				1300rpm	
条件 11					16sec



Case 1 : 条件 1



Case 2 : 条件 1

図 4 半径の時間変化（ピッチの影響）

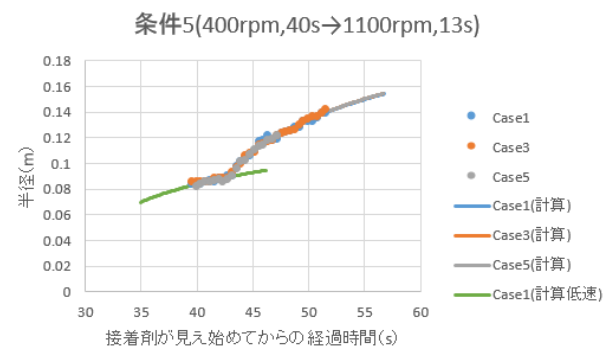
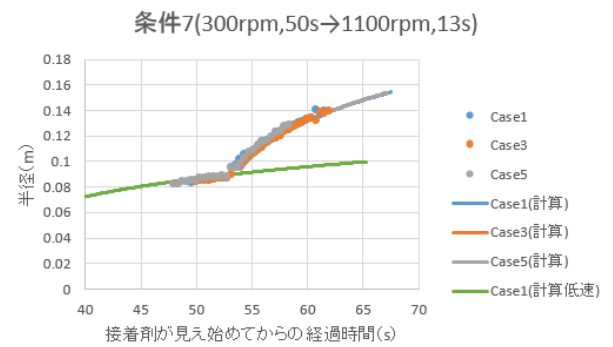
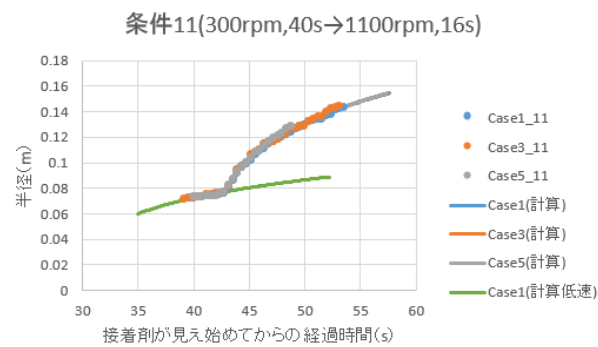
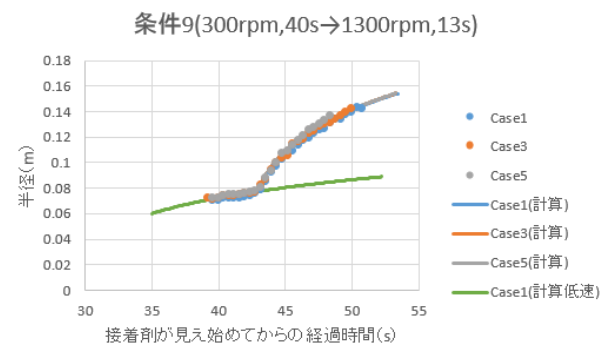
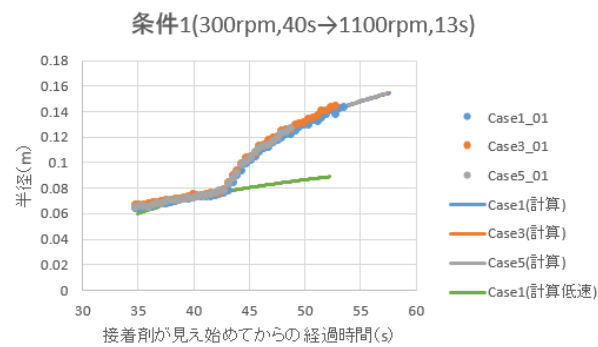


図 5 各種バンプおよび塗布条件に関する半径の時間変化

(2-3) バンプ付きウェハにおける膜厚制御方法に関する考察

前節までの検証を元に、初期段階における膜厚の調整において、最小の実塗布と膜厚測定回数により、目的とする膜厚に近づける方法を検証し、その方法を求めた。この方法は、段取り替え作業の際の作業時間の短縮にも貢献する方法である。

バンプのないベアウェハの膜厚変化式を元に、接着剤の粘性が $\Delta\mu$ 増加して厚さが Δh 変化したとすると、

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = 2 \frac{\Delta h_N}{h_N \left(1 - \frac{h_N^2}{h_0^2}\right)} \cong 2 \frac{\Delta h_N}{h_N} \quad \dots (4)$$

ここで、 h_0 は h_N に比べて十分に大きいと仮定した（以下においても同様の仮定を用いる）。上式より、粘性の変化割合は、厚さの変化割合の2倍であること、すなわち、粘性が2割増えたとき厚さは1割増加することが分かる。

また、各時刻における角速度を一様に α 倍にしたとき、 h'_N になったとすると、

$$h'_N = \frac{3}{2\alpha \sqrt{\frac{\rho}{\mu} \sum_{k=1}^N (\omega_k^2 + \omega_k \omega_{k-1} + \omega_{k-1}^2) \Delta t_k}} = \frac{h_N}{\alpha} \quad \dots (5)$$

上式から、厚さの目標値 h に対して得られた厚さが h' であった場合、時間の設定を変えずに各時刻における角速度を一様に h'/h 倍にすれば良いことが分かる。

一方、各ステップにおける角速度を変えずに時間間隔を一様に β 倍にしたとき、 h'_N になったとすると、

$$h'_N = \frac{3}{2\sqrt{\beta \frac{\rho}{\mu} \sum_{k=1}^N (\omega_k^2 + \omega_k \omega_{k-1} + \omega_{k-1}^2) \Delta t_k}} = \frac{h_N}{\sqrt{\beta}} \quad \dots (6)$$

上式から、厚さの目標値 h に対して得られた厚さが h' であった場合、角速度の設定を変えずに時間間隔を一様に $(h'/h)^2$ 倍にすれば良いことが分かる。

以上の内容を踏まえて、回転数を固定とした場合について、膜厚と回転数の関係を両対数グラフに示すと、いずれのバンプに関しても膜厚 δ と回転数 n の関係は概ね直線的となり、このことを回転数による膜厚の制御に利用することとした。

結果、以下の3つの方法にて狙い膜厚に近づける検証を行った結果、方法3は、方法1の8回に対して、十分小さい4回で相対偏差0.01%以下となった。

方法1： 得られた膜厚と目標値との比により回転数を決定する方法

($n_{i+1} = n_i \delta_i / \delta^*$ により回転数を更新)

方法 2 : 直線で外挿して次回回転数を決定する方法

$$(n_{i+1}=n_i+(\delta^*-\delta_i)(n_i-n_{i-1})/(\delta_i-\delta_{i-1}))\text{により回転数を更新}$$

方法 3 : 回転数と膜厚の関係を $n=C\delta^\alpha$ と仮定し、係数 C , α を今回および前回の結果から求め、目標の膜厚 δ^* となるような回転数を決定する方法

2-1-2 【1-2】マイクロバンプ段差、配置に応じた貼合後厚み解析

接着材の貼合に於いて、常温では流動性の無い粘度の高い状態の接着材を、加熱することで粘度を下げ流動性を高め真空中で貼合する。そのために接着剤が温度によりその粘性を含む各物性がどのように変化するかを把握する必要がある。よって、カタログやメーカーからは情報入手の難しい貼合時の解析に必要とされる材料の物性を計測した。

また、貼合処理においては、デバイスウェハ表面の段差や膜厚の影響さらには押し付けるチャックの平坦度等により、接着剤の流動が変化すると考えられる。接着剤の物性とシミュレーションによるその流動を把握し最適な貼合条件を求めた。

自動で貼合が可能な装置の完成により、各種バンプパターン付きウェハを実際に貼合し、その厚さ分布が解析結果と高いレベルで一致することを確認した。

(1) 実液を使った貼合処理に関する接着剤物性の取得について

貼合処理において、接着剤 1 及び接着材 2 に代表される仮接合用接着剤は、加熱することにより粘度を下げ、流動性を上げた状態で加圧される。しかし、接着剤メーカーからは、加熱状態で粘度や体積変化について一部の情報しか提供していない。よって、実際に接着剤を使用し必要な特性の測定を行い、貼合処理の解析に利用した。

(2) 貼合装置におけるシミュレーション解析

ウェハ貼り合せ解析では粘弾性体モデル、流体モデルでベースモデルの構築を試み、はみ出し量や形状に関する数値を算出し、貼合時に変化する物性値等の実測値をシミュレーションに取り入れ精度を上げてきた。

チップサイズにおいて、バンプ形状の影響についてもシミュレーションにより接着剤の流動を解析し、貼合時の状態変化や貼合条件の最適化につながる要因を把握した。

新規製作した貼合装置の特性を生かす塗布・貼合の一連処理において、ウェハサイズでの厚さ均一性を優先的に考慮することにより、特にウェハ外周部の接着剤の挙動に着目し最適化を行うこととし解析・検証した。

(2-1) チップサイズでの貼合流動解析

Si ウェハ貼合時の接着剤の流動・変形を解析する。ウェハと接着剤は上下チャックにより 200℃ に加熱されており、10000N・3 分間で貼り合わせられる。その際の接着剤の変形を解析する。接着剤を塗布された片側のウェハ面には、高さ 40um 程度、φ40um の多数のバンプ形状がある。接着剤は厚み 50um 程度で塗布される。

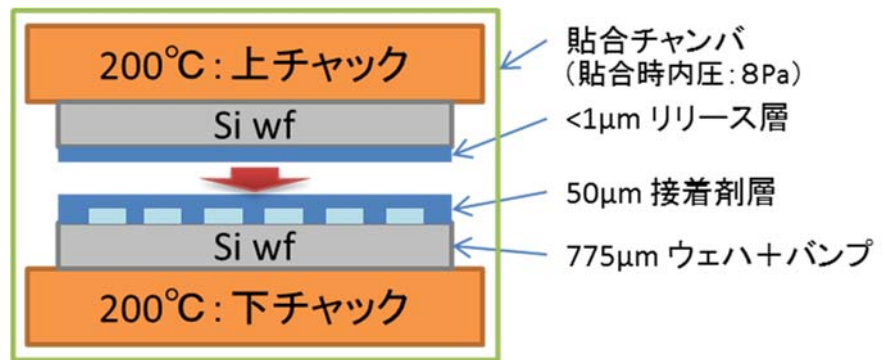


図 6 貼合モジュール解析モデル

□10mmのバンプの1チップ分を3次元モデルとしている。精度を高めつつ計算エリアを狭くすることで、計算量の低減を図った。また、接着剤の粘弾性特性には、前項で行った測定結果をもとに粘弾性モデルを作成している。解析には COMSOL Multiphysics™ ver5. 2a の構造力学モジュールを用いた。

バンプ無しの形状で、接着剤の接触・圧縮過程の経時変化を解析した。結果、接着剤に5μm凹凸のあるモデル については、接着剤の表面凹凸の緩和が得られた。チャックレベルが1μm凹凸のあるモデル については、チャックの表面凹凸の影響は小さかった。それぞれ、凹凸が緩和される時間に違いがあった。その段差の量や、剛性（硬さ）の違いによる影響を確認することができた。

(2-2) ウェハサイズでの貼合流動解析

前項において、1チップ（□10mm）サイズでの解析を行い、ミクロ的な接着剤への応力と変動を確認することはできたが、これを元にウェハ全域での解析を試みたが結果は得られなかった。

そこで、前項で行った実液を使った粘弾性測定結果により、実処理温度領域では接着剤の粘度が大幅に低下することから、接着剤を粘弾性材料から流体材料として扱うことが可能となる。流体材料として扱うことで、より計算重度の軽度な、構造と流体の連成モデルを構築することが可能となり、本モデルを用いることでウェハ全域における接着剤の挙動を確認することができた。

本解析に使用した解析モデルとその結果を図7に示す。前項のチップレベルの評価と同様に、貼合時間は6分としている。中央部が高く、ウェハ外周部に行くにしたがって接着剤の厚さが薄くなる傾向にある。また、粘度が高いことで、外周部の薄くなる傾向は小さくなる。これは実際の貼合結果でも同様となっており、今回の解析モデルが本現象の傾向を概ね表していることを示している。

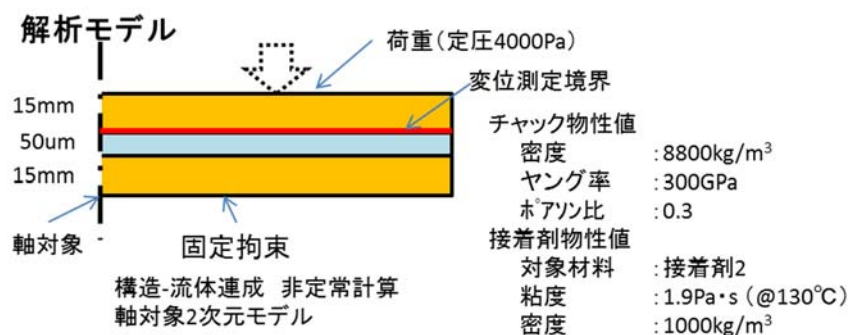


図 7 ウェハサイズでの解析モデル

(2-3) 実機構に基づく実用モデルでの解析

前項までの検証結果から、塗布膜（接着剤）のエッジ部の盛り上がりは貼合後の厚さ均一性に大きな影響を与えないことが確認できた。更に、貼合時の厚み均一性変化についてはウェハ外周部が最も変化が顕著であり、外周部の膜厚均一性に着目し解析を進めることでウェハ全体を制御できることが確認できた。そこで、接着剤の凹凸までを考慮した複雑な（解析時間を要する）モデルに変え、より実機構に沿ったモデル構造にて解析を行った。貼合状態におけるウェハ及びチャックの応力分布を図 8 に示す。

接着剤塗布膜のエッジ部盛り上がりは、貼合後の TTV に大きな影響を与えないことが実際の塗布後と貼合後の膜厚分布より確認できた。これを考慮すると、解析モデルの結果と実ウェハを使った貼合結果とは高い一致率を示すことも図 9 の通り確認できた。貼合により外周部程その接着層の膜厚変化は大きくなることも確認できた。

更に、この解析モデルを使って、厚さ均一性に影響を与えるパラメータを検証した。接着剤の物性よりもチャックの剛性の影響が大きいことが確認された。

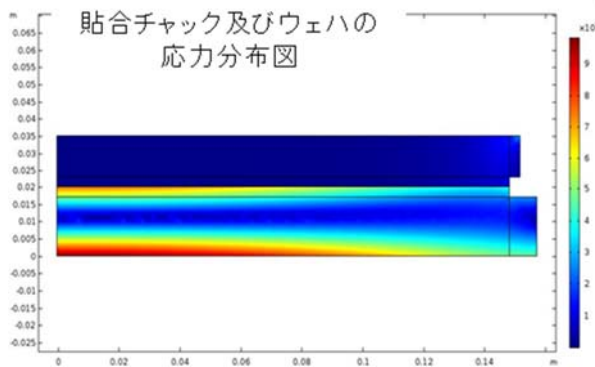


図 8 実機構に沿った解析モデル応力分布

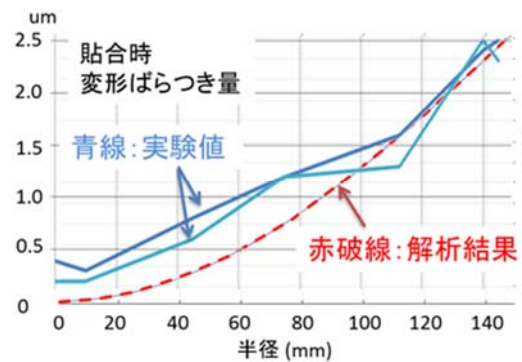


図 9 実貼合結果と解析結果の比較

2-1-3 【1-3】接着剤条件（温度による粘度変化）に応じた

塗布・貼合後厚み解析

塗布時の接着剤の挙動は、その溶媒の乾燥速度に依存し、更に乾燥速度は溶媒の物性、湿度、温度、気流等の影響を受ける。また、貼合においても接着剤は温度に対する硬化特性や強度が大きく異なる特性をもっており、熱可塑と熱硬化の両タイプ共に加熱しながら貼合を行う必要がある。

(1) 貼合時の温度を変えることによる貼合後の厚さ分布等への影響

2 種類の接着剤に対して貼合時の温度をメーカー推奨値からずらすことで、厚さ均一性と反り量にどのような影響があるかを検証した。前項で測定した結果からも、メーカー推奨貼合温度に対して $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 温度を変化させるだけで、接着剤の粘度は、6 ～ 100 倍程度の変化が発生し、貼合時の温度の影響が大きいことが容易に理解できる。

平坦ウェハを使って検証した結果、メーカー推奨の貼合時間に於いては、推奨温度が最適であることが確認できた。図 10 に接着剤 1 及び接着剤 2 において、メーカー推奨の貼合温度を変えた場合の違いを測定した結果を示す。本貼合装置が、メーカーの評価機器と同様に機能して

いることが確認できると共に、貼合時間・貼合温度・貼合時粘度が関係し厚さ均一性に影響していることも確認できた。

複数のパラメータが絡み合うことで、前項での貼合時の外周部の厚さ変化の解析等、シミュレーションによる最適化が必要となり、貼合条件の見直しやその結果をもとに機構部の改善等を実施することで、より改善を進めることができると考えられる。

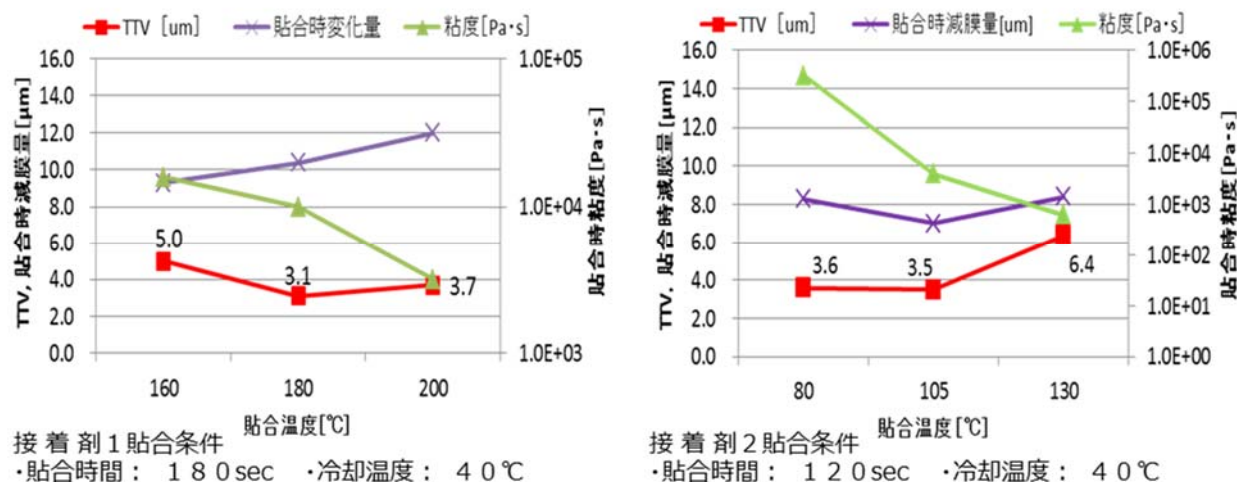


図 10 貼合温度による厚さ分布への影響

2-2-4 【1-4】解析+膜厚実測定による補正方式確立と品種切り替え時間の短縮

支持体仮接合装置として、材料や凹凸形状のウェハによる厚さ均一性の低下を抑制・補正し、安定的に均一な厚さの貼り合せができるシステムを構築する。

(1) 処理レシピ基本モデルのテーブルの構築と実機組込み

図 11 に示す通り、最終的な貼合システムの構築は各処理レシピとそれらを制御するための処理条件レシピとから構成される。自動貼合装置を構築し、自動搬送及び自動貼合が可能なる装置を製作し、その装置に貼合レシピとなる画面を製作した。

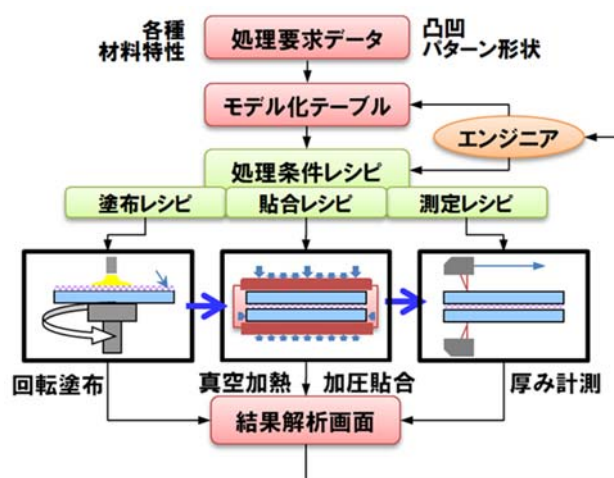


図 11 貼合装置のシステム概要図

各デバイスに合わせたモデルテーブルを構築するが、前項までの内容にある塗布及び貼合におけるシミュレーションの結果や、その過程での接着剤の挙動の性質を盛り込むことで、プロセス条件出しに要する時間を短縮する。

本事業において製作した貼合処理装置に対して、そのレシピ画面上に条件設定の項目を設けると共に、厚さ測定結果からのフィードバック可能なシステムを組み込むことにより、作業効率を高める対策を行った。

2-2 【2】接着剤膜厚均一化を実現する回転塗布システムの高度化

一般的に、半導体の製造工程（特に前工程）では、同一の製品を大量且つ安定的に生産するために最適化され高密度化されてきた。しかし、本事業の仮接合装置では、多様性が要求される後工程の装置であり、各デバイスメーカーも独自のプロセスを展開している。多様な材料やウェハの表面の凹凸に対応するために、エリアごとに膜厚を調整できる手法を確立する。

2-2-1 【2-1】エリア別膜厚制御方式確立

気流の流れを操作することで、塗布時の接着剤の乾燥を部分的に変更し、意図した膜厚にできないか検討を行う。空気流動の差による塗布膜厚への影響を確認する為の基礎実験を行い、結果をもとに検討を行った。

検証の結果より、膜厚の変化や分布の変化は見られたが、その影響（効果）は小さくまた塗布後の膜厚均一性を改善するには、制御性が低いと判断した。気流制御よりも、直接的に膜厚の分布を制御する方法を今後の継続課題として取り組むこととする。

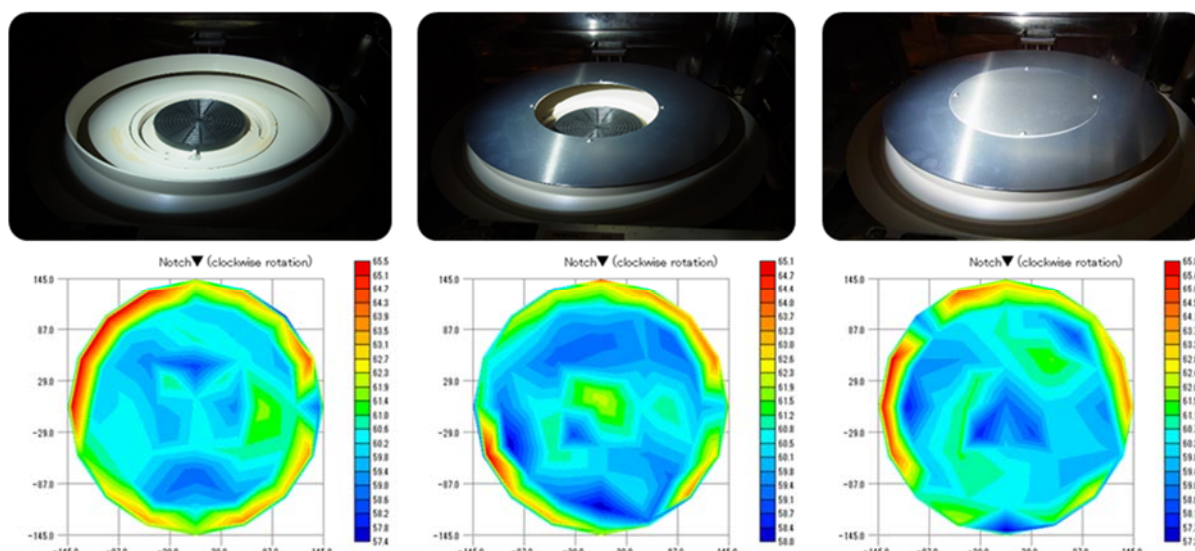


図 12 気流によるエリア別膜厚制御結果

2-2-2 【2-2】接着剤塗布均一化

川下企業で使用されるパターン付きのウェハを想定して、形状や配置の異なるパンプ付きウェハを数種類準備した。下記にその仕様を記載する。これらのパターンのパンプ付きウェハを使い塗布を行い、ウェハ表面の凹凸の影響を確認することとした。

実際のウェハを想定した各種パンプパターン付きウェハに対して塗布を行い、その結果膜厚の

均一性に強く影響を与える中央部の盛り上がり量は、 $1.1\mu\text{m}$ 以下であることを確認した。この結果は、前項の塗布時の解析の過程における考察からも、現在想定しているバンプの形状・密度等において、目標としている膜厚に $2\mu\text{m}$ 以上の差をつける可能性は幾位と判断した。

	① : -80mm	② : 中央	③ : +80mm	膜厚差
BUMP-01	55.5	56.0	55.1	$0.9\mu\text{m}$
BUMP-02	62.0	63.1	62.3	$1.1\mu\text{m}$
BUMP-03	52.5	53.3	53.0	$0.8\mu\text{m}$
BUMP-04	51.5	52.0	51.7	$0.5\mu\text{m}$

図 13 バンプ形状による塗布後膜厚分布への影響

2-3 【3】厚み均一化、高タクト化を実現する加圧システムの高度化

加圧駆動式の貼合モジュールの製作を通じて基本動作の確認と貼合処理能力の検証を行い、更には、ロードポート、アライメント、ロボットを組合せた装置により、一連の自動処理に要求される処理時間の短縮や貼り合せ精度、それらの安定性を検証した。図 14 に評価システムを示す。

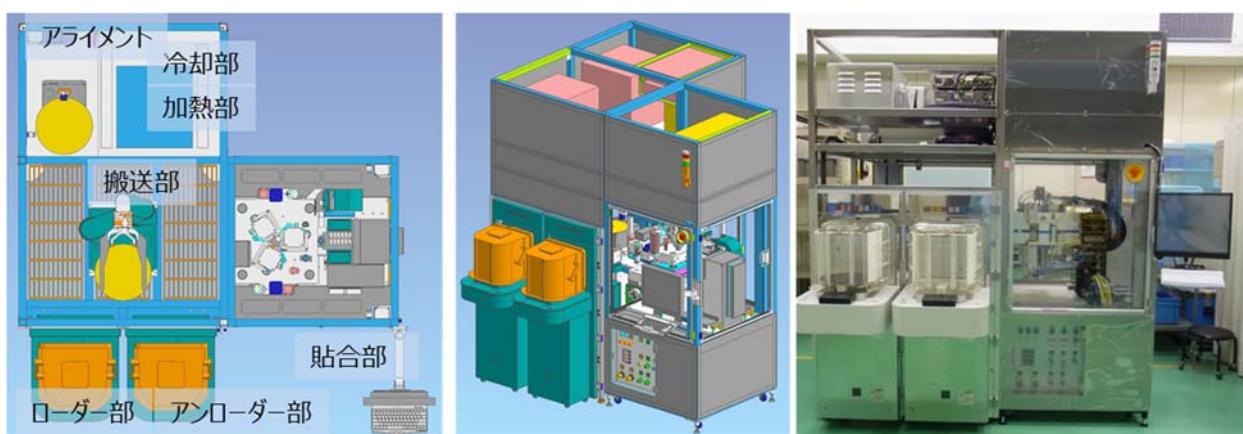


図 14 実評価用貼合装置のレイアウトと外観図

2-3-1 【3-1】エリア加圧による貼合後ワーク厚均一化

本事業で製作した自動搬送機付き貼合装置を使い、貼合後のウェハ厚さ均一性を検証した。検証には、数種類のバンプ付きウェハを使用し、実ウェハで発生する厚さのばらつきへの対応性能も確認した。図 15 にバンプ付きウェハの仕様を示す。

使用ウェハ仕様	BUMP-01	BUMP-04	Wide I/O
ウェハサイズ	$300 \pm 0.2\text{mm}$	←	←
チップサイズ	$10 \times 10\text{mm}$	←	←
Cuバンプパターン	Full	←	Full
直径[D]	$30\mu\text{m}$	$100\mu\text{m}$	$20\mu\text{m}$
ピッチ[P]	$60\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$	$40\mu\text{m}$
高さ[H]	$15\mu\text{m}$	$15\mu\text{m}$	$12\mu\text{m}$

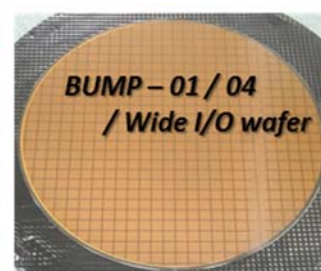


図 15 使用バンプ付きウェハ仕様

全面均一バンプパターン付きウェハと、実デバイスに近いWide I/Oパターンにバンプを配置したサンプルを準備し、貼合後の厚さ均一性の検証を行った。結果を図16に示すとおり、2.2～4.6μmの厚さ均一性を達成するとともに、これまでの多くのサンプル処理により安定性も確認でき、実際の生産ラインに対して十分使用可能と判断した。塗布直後の中央部が1μm程度厚くなることと、貼合によりウェハ外周に近づくにつれ接着剤の変形量が増えることが前項までに確認できているが、本評価の結果もそれを示している。

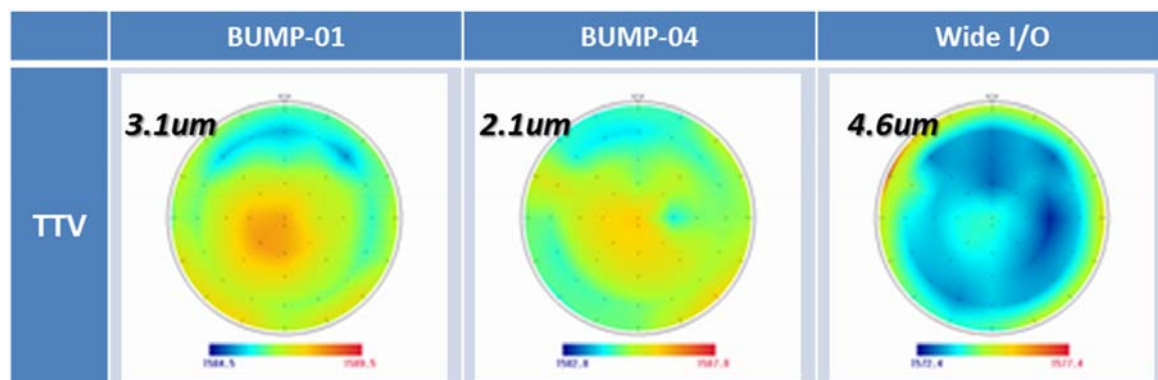


図16 バンプウェハ貼合後厚さ分布とTTV

2-3-2 【3-2】加圧工程タクト低減

処理時間及び受け渡し時間の短縮等を実施し、装置スループット（単位時間当たりの処理枚数）を向上するため対策と検証を行った。特にプロセス時間の短縮の為に、ウェハの昇温にかかる時間を短縮することが最も効果的であると判断し、貼合前に一旦ウェハを昇温し、貼合後には外部で冷却することを実施した。図17にその処理フローを示す。

貼合前の昇温及び、貼合後の冷却を行うことで効果的に時間の短縮ができ、連続処理に於いて効果が大きいことが確認できた。結果として、目標の120秒には届かなかったが200秒を達成し、貼合時間及び温度の最適化等により更に目標に近づけることが可能と判断している。

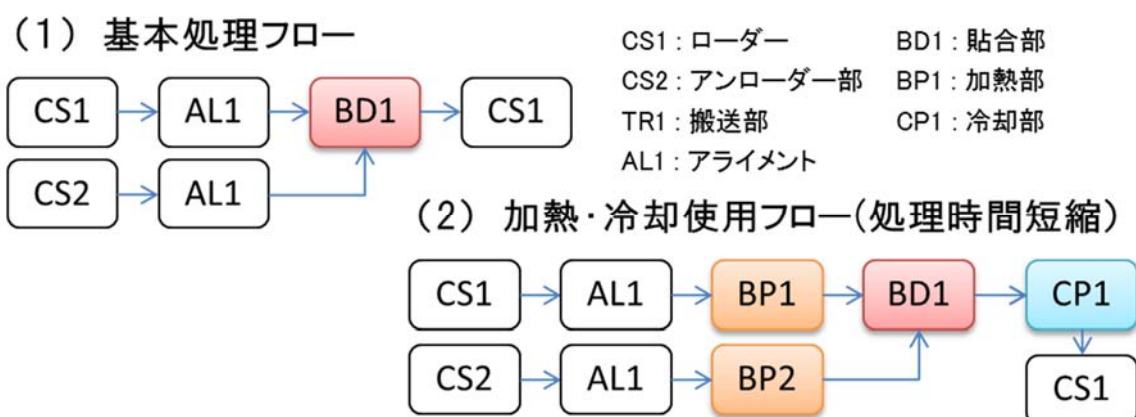


図17 貼合処理タクト短縮フロー

2-3-3 【3-3】貼り合わせ位置精度向上

事前検証モジュールを使って位置決め精度の確認を実施し、その結果を持って新規に自動貼合

装置を製作した。この自動機を使いウェハもロボットで自動搬送させ、本機能の精度及び安定性を検証した。図 18 にその結果を示す。

結果、目標の $30\mu\text{m}$ 以下の貼り合せ精度とその安定性を確認した。本事業での検証は、デバイス側及び支持体共に Si ウェハを使用しており、本機構はウェハの外周基準による位置合わせの為に、ウェハ及び支持体の形状に依存するが、今後多くのサンプル処理をすることで多種ウェハへの対応を行うこととする。

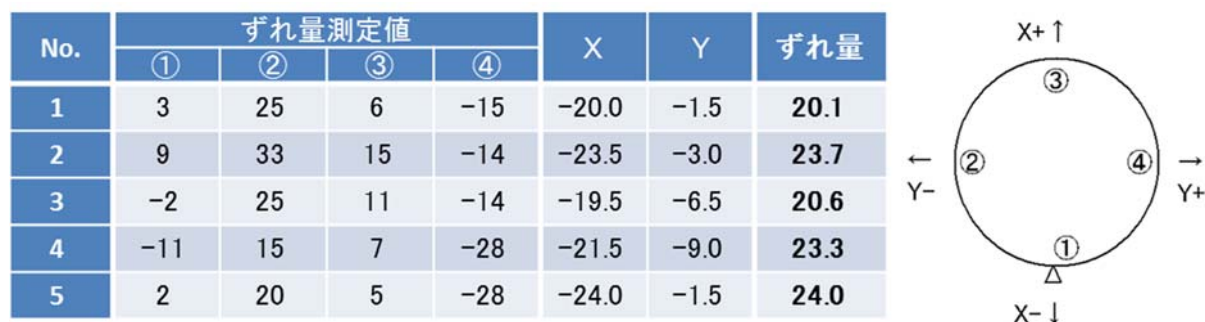


図 18 貼り合せ位置精度測定結果

2-4 本事業にかかわる知的財産権等について

本事業に関して、以下の特許に関する申請を実施していますので記載します。

(1) 出願済み特許 1

出願番号： 特願 2016-232353
 知的財産権の種類： 特許権
 開発項目： ウェハチャック部の吸着面における高い平滑性を維持することが可能な貼合装置の開発
 出願国： 日本
 発明の名称： 「貼合装置」
 出願日： 平成 28 年 11 月 30 日
 出願人： タツモ株式会社

(2) 出願済み特許 2

出願番号： 特願 2016-232354
 知的財産権の種類： 特許権
 開発項目： ウェハ等を対象とした位置決めにおいて高い精度を簡易に実現することが可能な技術の開発
 出願国： 日本
 発明の名称： 「アライメント機構、チャック装置、及び貼合装置」
 出願日： 平成 28 年 11 月 30 日
 出願人： タツモ株式会社

最終章 全体総括

3-1 成果概要

ウェハと支持体とを自動で高精度に貼り合せするシステム（ハード及びソフト）の商品化に向けて、一連の処理である塗布・貼合を含むシステムの構築に取り組んだ。

塗布及び貼合において、必要とされる材料の特性評価をはじめ、塗布・貼合における様々な特徴を、解析や実験を行うことで求め、装置運用時に必要とされる作業の軽減や処理性能の向上を進めた。

特に、岡山県立大学 尾崎先生との共同研究により、実塗布の結果とシミュレーションの結果との高い一致率が確認できており、これまで課題であった液状薬液の回転塗布においても、事前の検討が可能であることが確認できた。トライ・アンド・エラーで進めてきたこれまでの塗布・貼合処理において、その時間を短縮し今後の装置の高度化を進めるうえでの大きなきっかけとなる機能を搭載できる目処が立った。

結果、新しい方式の貼合システムの製作を行い、各種デモやサンプルの作成が可能な状態に仕上がった。

性能面では、貼り合せ精度は加熱・加圧しながら $3\mu\text{m}$ が達成できることを確認し、貼合精度も目標の $30\mu\text{m}$ を達成した。塗布時における塗布液（接着剤）の塗り広がりや厚さの制御について解析・検証を行い今後の条件だし作業の大幅な短縮の目処が立った。また、貼合においても、実機に即したモデルを構築し貼合時の膜厚変化を予測し貼合温度・時間を求める道筋を作った。

3-2 事業の成果に関する事業化展開について

当初の目標であった、新規貼合システムに必要な技術を開発し、合わせてデモ対応可能な装置を製作できた。既に生産ラインへの採用に向けてデモ対応を進めており、装置の評価を進めながら多様なデバイスや接着剤に対応できるシステムにするように取り組んでいる。

今後生産機として、処理時間の短縮やクリーン度の要求、安定性向上を更に進めていくと共に、多様性を突き詰めることで事業化展開を進めていく予定である。

以上、成果報告させていただきましたが、これまでの3ヶ年にわたり、本事業の達成の為に多くのご支援、ご指導、ご協力等いただきました皆様方に対し、厚く御礼申し上げます。大変ありがとうございました。