

平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「半導体デバイス製造工程における回転霧化式
エアロゾルスプレーによる成膜装置の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年 9月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人名古屋産業科学研究所

目 次

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	
1-2 研究体制	
1-3 成果概要	
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	
第2章 成膜装置の試作開発	6
2-1 成膜装置の概要	
2-2 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの開発	
2-2-1 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの機構	
2-2-2 カップおよびキャップの形状検討	
2-3 静電発生装置の開発	
2-4 ウェハ用ホットプレートの開発	
2-5 メインカップおよび廃レジスト回収装置の開発	
2-5-1 メインカップの構造	
2-5-2 カップ洗浄部	
2-6 XYアクチュエータの開発	
2-7 定量少量レジスト供給装置の開発	
2-8 制御装置および通信装置の開発	
2-8-1 成膜装置の制御装置の開発	
2-8-2 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの制御装置	
第3章 プロセスの研究開発	14
3-1 プロセスの研究開発の目標	
3-2 TSVウェハの最適成膜条件による成膜	
3-3 TSVウェハの溝深さ影響確認	
3-4 TSVウェハ間口形状の影響確認	
3-5 プロセスの研究開発のまとめ	
第4章 成膜装置の安全性評価 (SEMI規格審査)	18
4-1 SEMI規格の必要性	
4-2 SEMI S2, S8による安全性評価	
4-3 EMC(Electro-magnetic compatibility)評価	
第5章 ナノインプリントを用いた新しいTSV評価方法の確立	19
5-1 研究目的	
5-2 TSVウェハとビアホール内の非破壊計測法の提案	
5-3 実験結果および考察	
5-4 まとめ	
第6章 川下ユーザでの生産プロセスでの評価	22
第7章 全体総括	22

- 7-1 成果の総括
- 7-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況
- 7-3 今後の事業化に向けた取組み

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

中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針に基づくように、近年、半導体デバイスの小型化、高性能化に伴い、図 1.1 に示すような 3 次元スタック構造パッケージの実用化が進み、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のロードマップにおいても、貫通電極 (TSV 電極) による SiP (System in Package) 実装が基盤技術として取り上げられている。また次世代半導体材料プロセス基盤技術開発 (MIRAI) プロジェクトにおいても研究開発が取り組まれている。

3 次元スタック構造のデバイスでは、層間の電氣的な導通の役割を担う層間電極が必要となり、図 1.2 に示すような、配線と層間電極を一度に形成するデュアルダマシン法が有効であり、実用化されている。デュアルダマシン法では直径 $20\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 、深さ $30\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の配線溝を形成した後、層間電極のための $5\sim 20\mu\text{m}$ の貫通孔をフォトリソグラフィで形成するために、配線溝の側面のみレジストを成膜する必要がある。しかし、図 1.3 に示すように従来のレジスト成膜に広く使われているスピコート法では、レジストを遠心力で引き伸ばすために、このマイクロメータオーダのビア壁面にレジストを成膜することができない課題がある。川下ユーザでは、試作段階ではレジスト付のドライフィルムをウェハに押し付けてレジストの成膜を行っているが、量産においては、歩留りの低さやコスト面で、生産技術は未だ確立されていない。

そこで、図 1.4 に示す回転霧化式エアロゾルスプレーによる成膜装置の研究開発を実施し、川下ユーザへ TSV ビア壁面の成膜技術を提供する。

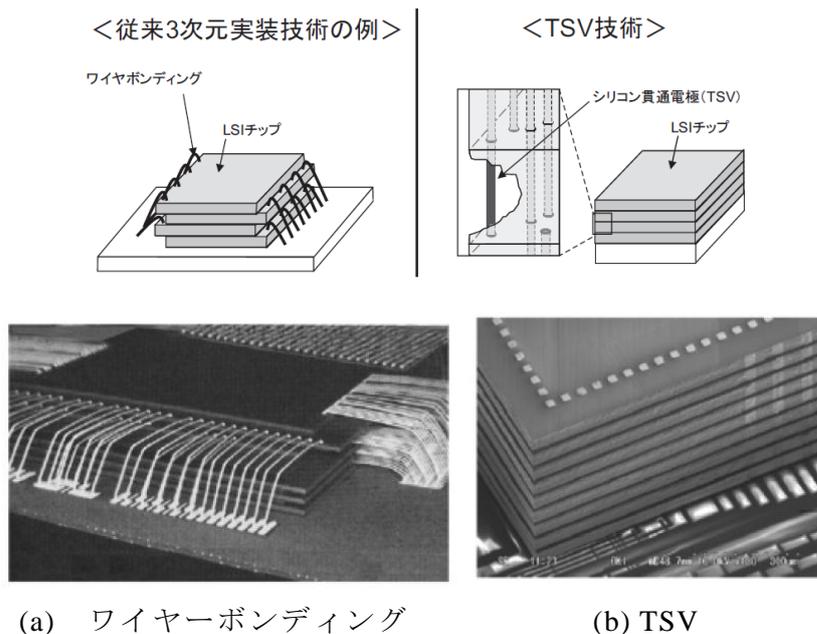


図 1.1 3 次元スタックの半導体デバイスの構造

(出展：傳田精一:シリコン貫通電力 TSV, 電機大出版局)

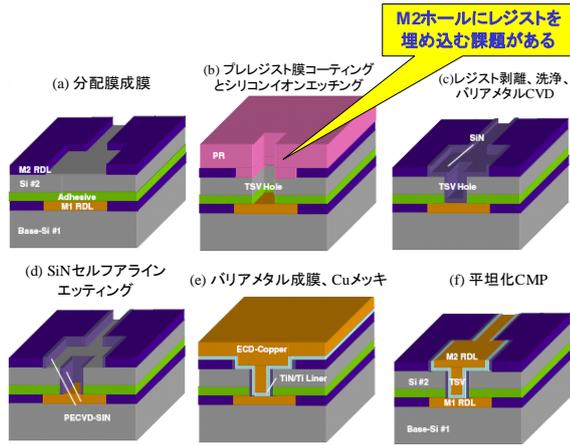


図 1.2 貫通電極形成の製造プロセス

(出典 : S. Tominaga etc., Jpn. J. Appl. Phys. 49,(2010),05FG01)

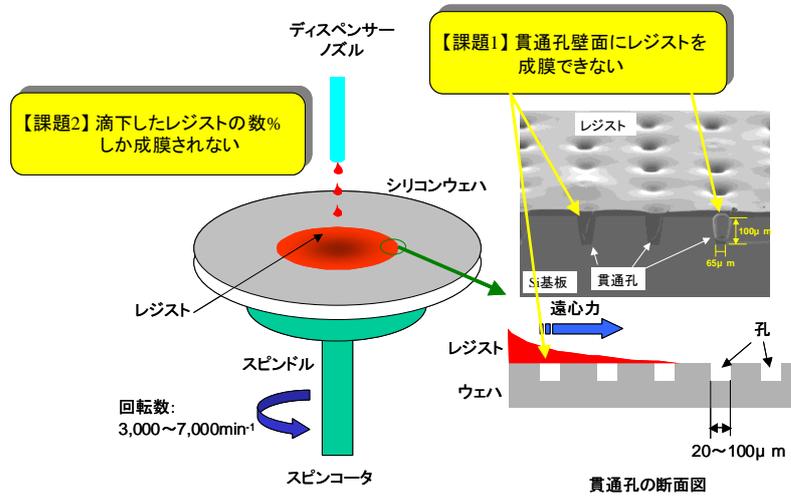


図 1.3 従来の技術（スピンドルコート法）

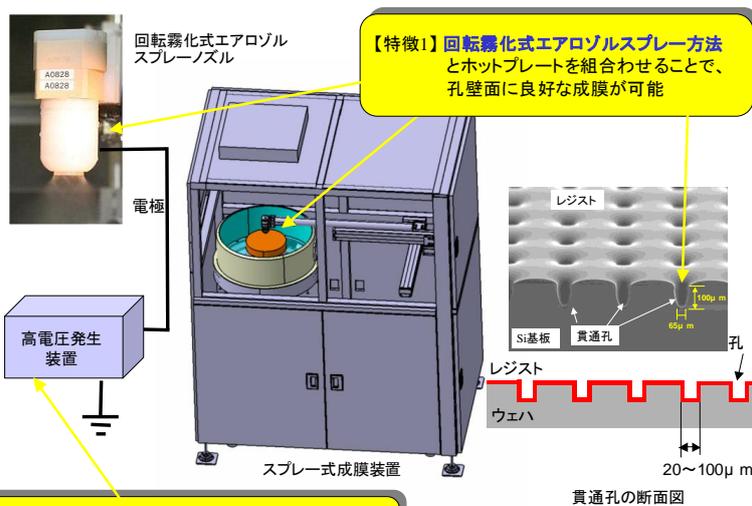


図 1.4 新技術（回転霧化式エアロゾルノズルによる成膜装置）

1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

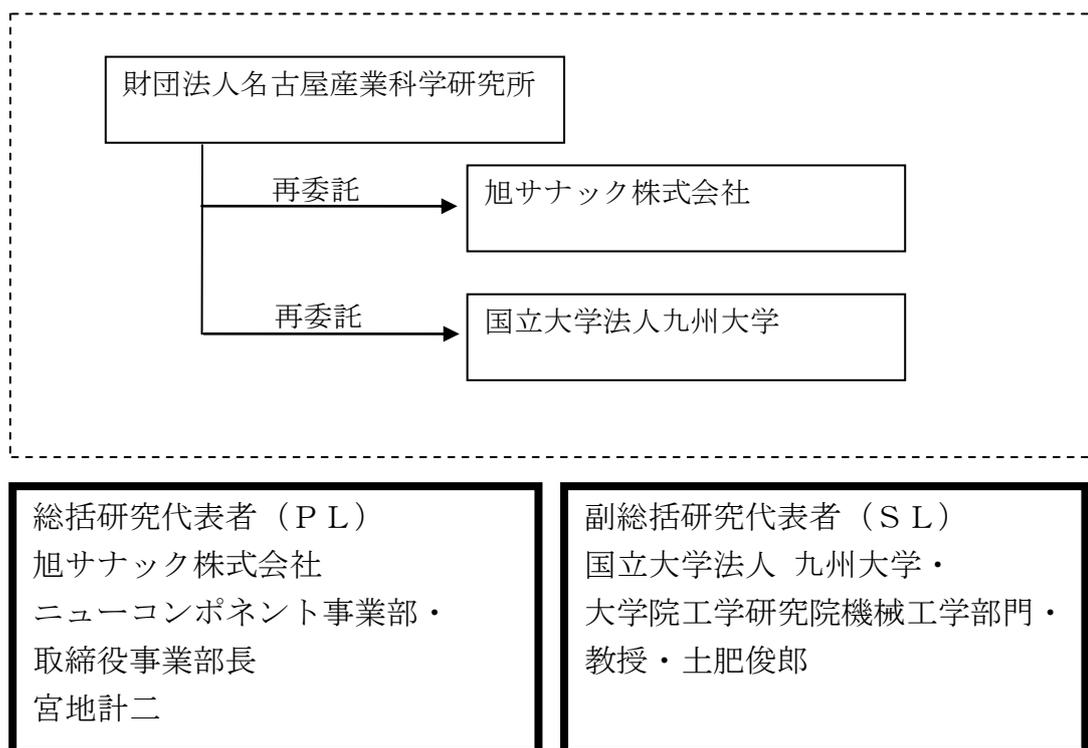


図 1.5 研究体系図

研究体制図を図 1.5 に示す。本事業は財団法人名古屋産業科学研究所に委託した。再委託先は旭サナック株式会社と国立大学法人九州大学とした。本事業のプロジェクトリーダー (P L) は旭サナック株式会社 NC 事業部 取締役事業部長 宮地計二氏、サブプロジェクトリーダー (S L) には国立大学法人九州大学 大学院 工学研究員 知能機械システム部門 教授 土肥俊郎氏とした。

研究員は、旭サナック株式会社より、宮地計二、清家善之、星野幸一、西尾達哉、柴田達夫、長瀬正宜、大谷建太郎、小林義典、高村淳、瀬瀬博、山本浩之、明永裕樹、森下浩史、梅田安香、染田直樹、竹岡弘貴の 16 名、国立大学法人九州大学より土肥俊郎、黒河周平、大西修の 3 名である。またテクニカルスタッフとして大坪正徳が実験を行った。

1-3 成果概要

本研究は、回転霧化式エアロゾルスプレーによるレジスト成膜装置を 2 台試作し、成膜装置の評価と実際にテストパターンを形成した T S V ウェハで成膜実験を行い、川下ユーザで最適な T S V 内へのレジスト成膜を実施するためのプロセス開発を実施し、最適な条件を導いた。

また、川下ユーザに安全に使用して頂くために、試作した成膜装置を第三者機関で半導体製造装置の安全規格となる SEMI S2 (半導体製造装置の環境・健康・安全のガイドライン) および SEMI S8 (半導体製造装置の人間工学エンジニアリングに対する安全ガイドライン) および EMC (Electro Magnetic Interference; 電磁環境適合性) の審査を受審し、一部修正は必

要となるものの、試作した成膜装置が安全に使用できることを確認した。

最後に成膜装置を川下ユーザにご使用して頂き、本技術がTSV製造工程に有効であることを確認した。表1に仕様書の研究項目および目標値と本研究で得られた結果を示す。25項目中17項目が目標を達成し、8項目が今後の改善により目標を達成できる見込みとなり、今後川下ユーザへ装置を提供する場合に反映させる。未評価の項目は無かった。

表1 仕様書の研究項目および目標値と本研究で得られた結果

研究項目および目標値	得られた結果	評価
①成膜装置の試作開発		
①-1 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの開発		
a.飛行液滴特性 飛行液滴径10μ m以下 飛行液滴速度20m/s~60m/sで容易に可変可能	回転霧化式エアーピンを開発し、飛行液滴径10μ m以下 飛行液滴速度20m/s~60m/sで容易に可変可能	○
b.発生パーティクル 90nm以上0個/wafer	90nm以上0個/wafer	○
c.金属汚染度: 金属元素、イオン各 1ppb以下	ICP-MASSで測定 72金属元素に対しすべて1ppb以下	○
①-2 静電発生装置の開発		
a.静電気によるデバイスの破壊が無いこと	テストサンプル基板では破壊なし 但し、川下ユーザでの評価の必要あり	○
①-3 ウェハ用ホットプレートの開発		
a.ウェハ面内温度分布 80°C±3°C	100°C±3°C	○
①-4 水洗式カップおよび廃レジスト回収装置の開発		
a.カップ汚れ起因による不良 0件	機器設計で対応 川下ユーザでの評価必要あり	△
b.メンテナンス回数: 24時間稼働で1回/月	機器設計で対応 川下ユーザでの評価必要あり	△
①-5 ミストレスカップの開発		
a.カップ汚れ起因による不良 0件	機器設計で対応 川下ユーザでの評価必要あり	△
b.メンテナンス回数: 24時間稼働で1回/月	カップの構造でメンテナンス回数を減らせる構造とした	○
①-6 XYアクチュエータの開発		
a.アクチュエータ位置決め精度±0.02mm	±0.02mm	○
b.火災・爆発の可能性0%	SEMI審査により、気流の流れを監視する構造とする必要あり	△
①-7 定量少量レジスト供給装置の開発		
a.レジスト供給量 2~20ml/min±1%		○
b.レジスト金属汚染度: 金属元素、イオン各 1ppt以下	ICP-MASSで測定 72金属元素に対しすべて1ppb以下	○
①-8 制御装置および通信装置の開発		○
①-9 装置化		
a.販売価格 10,000千円	-	△
b.外観サイズ: 幅1350mm×奥行900mm×高さ1800mm	幅1350mm×奥行900mm×高さ1800mm	○
c.処理時間: 60秒/枚	2回塗布 1回目塗布 107秒 2回目塗布 107秒 合計 2分14秒 ウェハリベーク時間 1分	△
d.装置内の清浄度: Class1000	0.5μm以上 0個	○
e.安全性: 半導体安全規格準拠	試作機で半導体安全性の評価を受審。 今後、量産機へ反映させる	△
②成膜装置の評価	評価完了	○
③プロセスの研究開発		
a.ウェハ面内に存在する直径20μ m、深さ100μ mのすべての孔(2000万個/8インチウェハ)へのレジスト成膜率: 100%	50μmまでのTSVまで成膜できることを確認 20.30μmのTSVについては、レジスト成膜率が低い ただし、現在川下ユーザで使用しているTSVの径は60μm以上であるため、生産プロセスで使用できると判断	○
b.レジストの膜厚精度: 3μ m±5%	レジスト2塗り 18.1μm±3.8%	○
c.レジスト成膜効率: 70%以上	34%	△
④ SEMI規格および安全規格の審査	試作機でSEMI規格および安全審査を受審 一部、安全性の指摘項目があったが、川下ユーザへ導入する実生産装置で反映する。	○
⑤ 川下ユーザでの評価	川下ユーザの立会いで実験評価 本技術が使用できるとの判断	○

○: 目標値達成
△: 今後の改善により目標を達成できる
×: 未評価

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人 名古屋産業科学研究所 中部ハイテクセンター

産学連携支援部門 担当部長 古川俊治

電話：052-223-5694 FAX：052-211-6224

E-mail：furukawa@nisri.jp

第2章 成膜装置の試作開発

2-1 成膜装置の概要

今回試作した回転霧化式エアロゾルスプレーを用いた成膜装置の概略図を図 2.1 に示す。この装置の主要素技術としては、①回転霧化式エアロゾルスプレーノズル、②静電発生装置、③ウェハ用ホットプレート、④水洗式カップおよび廃レジスト回収装置、⑤ミストレスカップ、⑥防爆式XYアクチュエータ⑦定量少量レジスト供給装置⑧制御装置および通信装置の8要素で構成される。本研究開発は、各要素技術の開発を行い、要素技術を取り込み、スプレー式成膜装置を試作する。装置は、川下ユーザが、安全に使用するために、半導体安全規格に沿った形で試作する。成膜装置の試作開発は、旭サナック株式会社がを行い、旭サナック株式会社(図 2.2)と国立大学法人九州大学(図 2.3)に設置した。

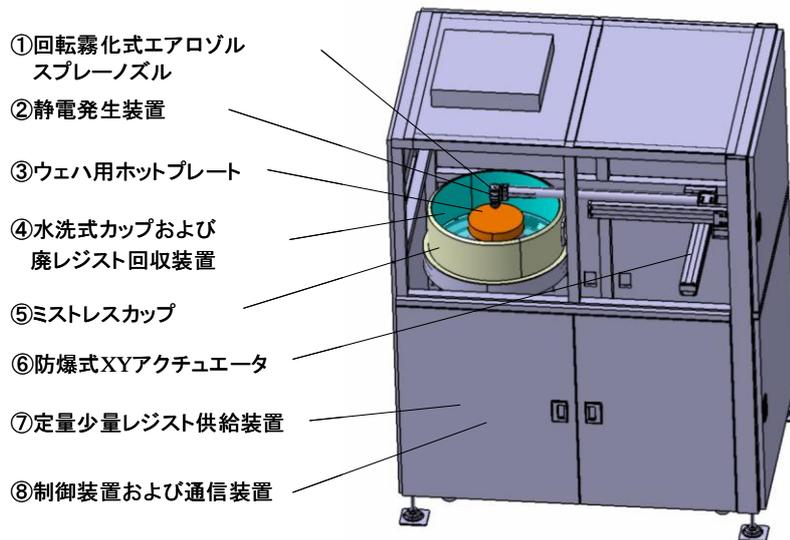


図 2.1 回転霧化式エアロゾルスプレーを用いた成膜装置と各主要素技術



図 2.2 旭サナック株式会社に設置した成膜装置



図 2.3 国立大学法人九州大学に設置した成膜装置

2-2 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの開発

2-2-1 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの機構

図 2.4 に示す回転霧化式エアロゾルスプレーノズルは、ノズル先端のカップを最大 $70,000\text{min}^{-1}$ で高速回転させて、その遠心力を利用して $10\mu\text{m}$ 以下の飛行液滴を生成し、圧縮エアと共にウェハへ噴霧して成膜する。

カップの回転数で飛行液滴のサイズを、圧縮エアの圧力で飛行液滴の速度を自由に制御できるという特徴をもつため、一次開発ノズルにて、微小ビア内壁面へ成膜が可能であることを実験で確認している。また回転機構にエアタービンを採用することで、回転部が非接触となり発生するパーティクル（微小屑）も最小に抑えることができる。

回転霧化式エアロゾルスプレーノズルは、エアタービンを利用して、カップを高速回転させている。そのため高速回転を長期間安定させて稼働させるために、エアタービン偏芯測定装置を用いて振れ量を測定し、エアタービンを $10\mu\text{m}$ 以下の振れに抑える技術を確立した。さらに回転霧化式エアロゾルスプレーノズルにおいて、最大 $70,000\text{min}^{-1}$ の必要な高速回転を、エアタービン用マーカを用いて検証した。また、ビア内へのレジスト成膜の安定性を確立するため、高速度ビデオカメラを用いてレジスト噴霧パターンを確認した。



図 2.4 開発した回転霧化式エアロゾルスプレーノズル

2-2-2 カップおよびキャップの形状検討

回転霧化エアロゾルスプレーノズルにおいて、飛行液滴のサイズ、速度を決定するカップの形状とキャップの形状は主要技術の一つである。そのためカップとキャップの形状を検討した。

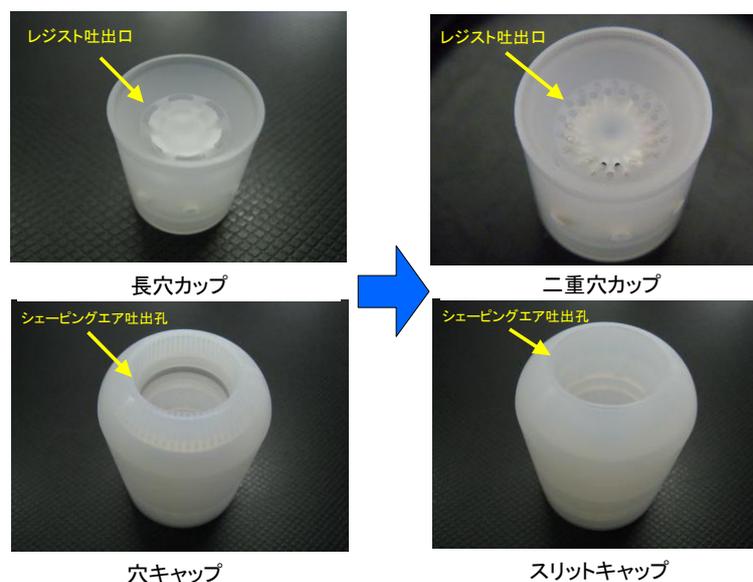


図 2.5 1次検討したカップとキャップ

図 2.5 に 1 次検討したカップとキャップを示す。カップはエアタービンの主軸と連結され高回転で回転させ、レジストを液滴にする役割を持つ部品である。従来当社で扱っていたカップはレジストの噴霧口が長穴であったが、噴霧するレジストの粗密が大きくなることが予想されるため、レジスト噴霧口をφ0.5mm の穴を 36 個千鳥状に配列したノズルを試作し、評価した。キャップは圧縮エアをウェハに向かって噴射する役割を持つ。従来直径 0.6mm の穴が 60 個配列されていたが、噴霧する粗密を小さくする目的で、スリットタイプを試作し評価した。また圧縮エアを整流するために、回転方向の逆向きに角度 45° の遮蔽スリットをキャップ内部に設けた。液滴噴霧の観測は図 2.9 のように、高速度ビデオカメラ (IDT 社製 Motion pro X) を使用した。回転霧化式エアロゾルスプレーの噴霧条件として、タービンの回転数 30,000min⁻¹、シェーピングエア圧力 0.2MPa、噴射流量 30cc/min で純水を噴霧した。

観測結果を図 2.6 に示す。カップにおいて、穴タイプと長穴タイプを比較すると、長穴タイプの方が穴タイプよりも、粗密の間隔が長いことが分かった。キャップにおいては、45° の遮蔽板でシェーピングエアを整流することによって、液滴の噴霧方向が傾くことが分かった。これら、高速度ビデオカメラの実験結果から、カップとキャップの 1 次評価においては、穴タイプのカップとスリットタイプを採用した。

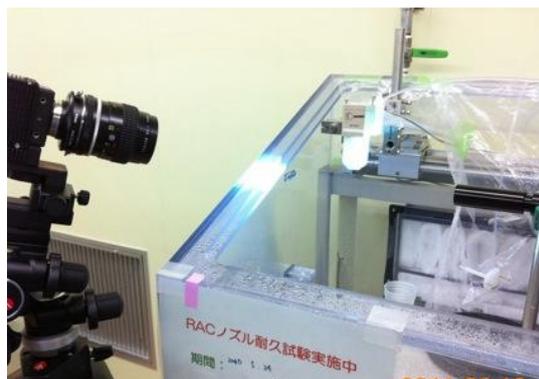


図 2.5 高速度ビデオカメラによる測定の様子

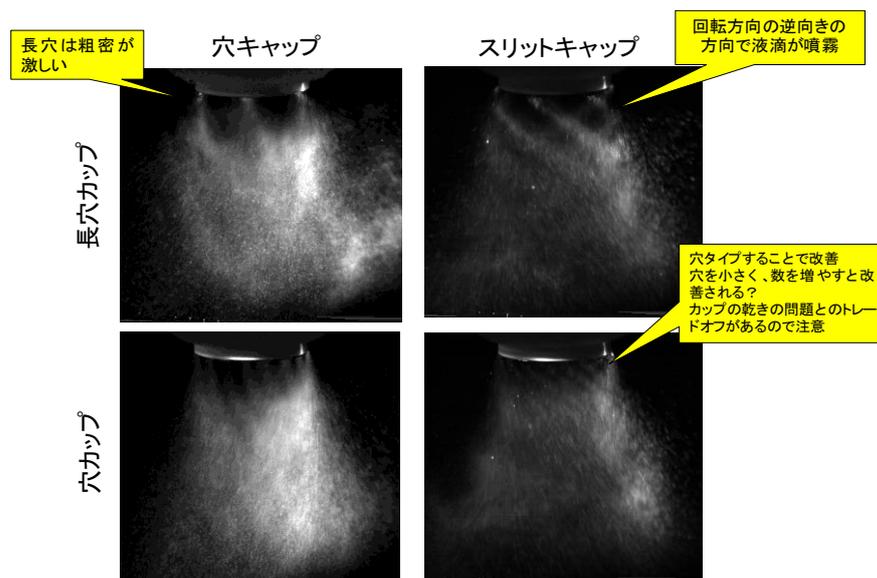


図 2.6 1 次検討したカップとキャップの液滴の様子

2-3 静電発生装置の開発

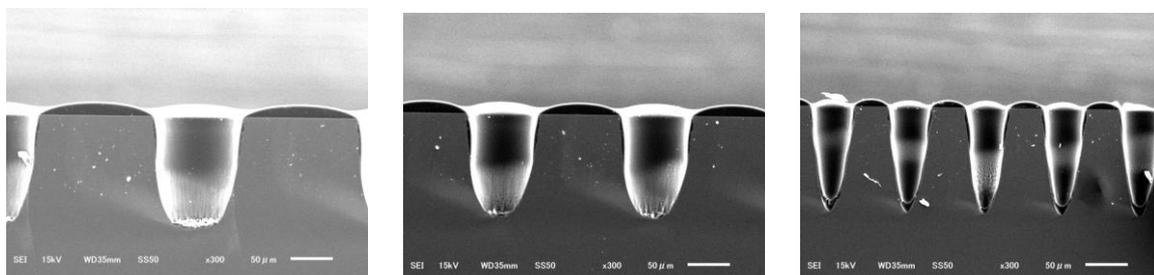
回転霧化式エアゾルスプレーノズルに高電圧発生器を設置し、噴霧するレジスト液滴に帯電させることにより、ビア内のエッジ部にレジストを成膜可能とすると共に、レジストの付着効率を高める。

実際に TSV の TEG(Test Element Group) ウェハを用いて膜厚の実験を行った。噴霧条件はエアタービンの回転数を $70,000\text{min}^{-1}$ 、シェーピングエア圧力を 0.19MPa 、レジストの噴霧量を 6g/min 、ノズル先端からシリコンウェハまでの距離を 25mm として、ノズルを速度 10m/s で、重ね合せピッチを 5mm で千鳥状にシリコンウェハ上を揺動させて成膜した。噴霧する液は東京応化工業社製 LA900 (10wt%) とした。

塗布後、ウェハを割り、その断面を電子顕微鏡 (日本電子社製 JSM-6610) で観察した。実験結果を図 2.7 に示す。詳細は第 3 章で述べるが TSV へのレジスト成膜は TSV 底部、壁面、ビアの角部、表面の膜厚を厚くする必要がある。今回の実験においては、TSV 底部、壁面、ビア角部の膜厚の変化は無かった。一方表面部の膜厚においては、ビア径 $20\sim 80\mu\text{m}$ の場合、高電圧を付加することで膜厚が約 1.5 倍厚く塗布された。このように TSV には高電圧の効果が確認された。しかし、各 TSV の径で、高電圧の有無に関して効果の確認はできたが、電圧の違いによる膜厚の変化は見られなかった。

以上のことからレジストを帯電させる成膜方法は、レジスト成膜率の効果が向上することが分かった。

SEM像



表面部膜厚

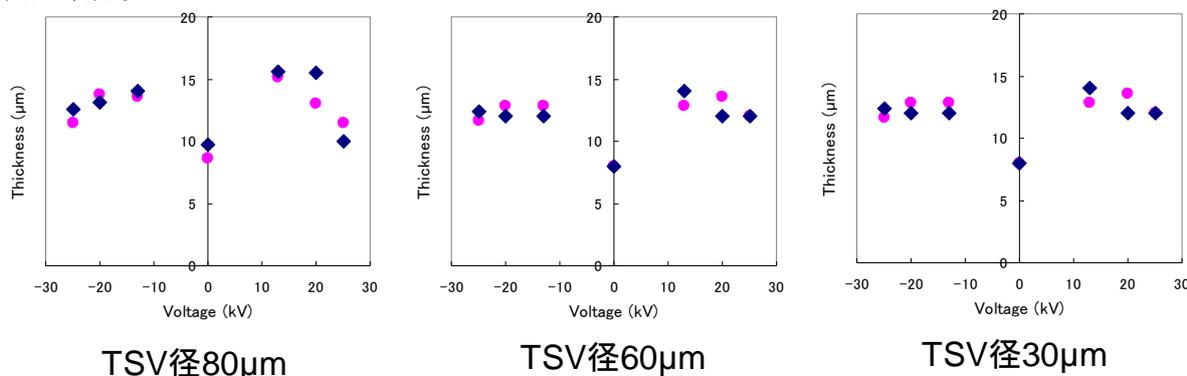


図 2.7 高電圧を付加してベアシリコンウェハにレジストを成膜した結果

2-4 ウェハ用ホットプレートの開発

スプレー成膜時にウェハに温度をかけるためのホットプレートを試作した。半導体ウェハを昇降させる機構やホットプレートの面内温度分布の均一性が主要技術となる。

開発したホットプレートの概観を図 2.8 にホットプレートの概略仕様を表 2.1 に示す。ホットプレートは直径 200mm のウェハに対応しており、温度を常温から 150°C まで設定することが可能である。ホットプレート内部には 2 つの熱電対が設置してあり、フィードバック制御して、温度を一定に保つ構造となっている。ホットプレート内部に設置してあるリフトピンはエアシリンダで上下駆動する。リフトピンにウェハを載せ、リフトピンを下げることによってホットプレート上に載せることができる。ホットプレート上に載せられたウェハは真空吸着され、ウェハ面内の平坦性を保つ構造となっている。

スプレー成膜時にウェハの裏面が汚染されないように、ホットプレートの外側に、直径 0.3mm で 120 個の N2 ノズルを配置した。

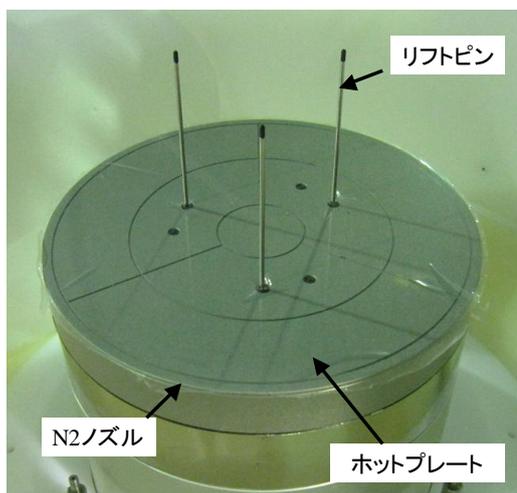


図 2.8 ホットプレートの外観

表 2.1 ホットプレートの概略仕様

温度範囲	常温～150°C
温度分布	120°C, R ≤ 1°C
HP材質	アルミニウム (硬質アルマイト処理)
形状・サイズ	Φ 200ウェハ対応
吸着	吸着穴:φ 1 吸着溝幅:1mm 深さ:0.5mm
リフトピン	エアシリンダ駆動 3本 (φ 2,先端PEEK)
N2ノズル	φ 0.3×120個

2-5 メインカップおよび廃レジスト回収装置の開発

2-5-1 メインカップの構造

図 2.9 にメインカップを示す。スプレー成膜はカップ内部でされ、成膜されなかったミストを回収するとともに再利用するものである。同時にウェハおよび装置の汚染防止の役割を持ち、成膜する上で TSV ウェハの品質を保つために重要な要素である。メインカップは排気機能があり、上部と下部から排気を行っている。底面は汚れを防止するために、溶剤を張る構造となっている。側面の汚れ防止には、フッ素樹脂の細いチューブをブラシ上に配置し、ミストを付着させ、定期的に溶剤を流して、チューブ全体を洗浄する構造となっている。

このような構造にすることで、メインカップ汚れに起因による不良を防止し、メンテナンス回数を 24 時間稼動で 1 回/月で済むと見込んでいる。

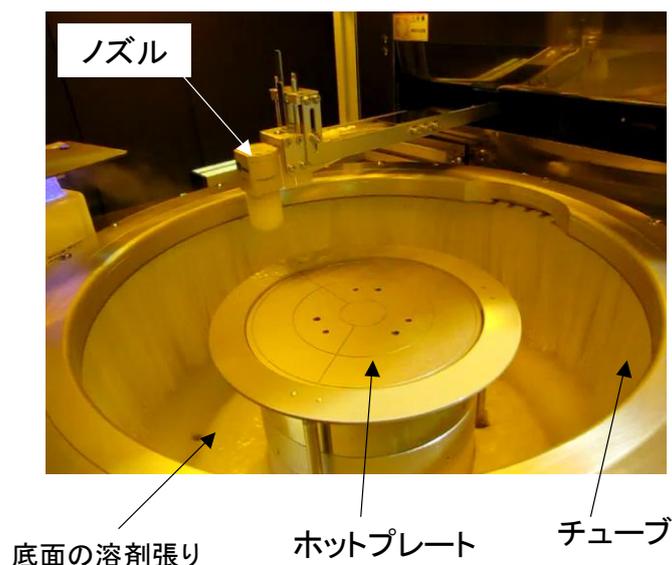


図 2.9 メインカップ構造図

2-5-2 カップ洗浄部

レジスト成膜の品質を安定させるために、カップの洗浄は非常に重要である。カップが汚れたまま使用するとカップに付着したレジストが固体化し、それをウェハに吹き付けて不良を起す危険性がある。そのため図 2.9 に示すようなノズル洗浄機能を持たせた。洗浄は中央部のチューブから溶剤を噴射して、その回りから圧縮エアで溶剤を液滴化する二流体ノズルの構造とした。



図 2.9 カップ洗浄の様子

2-6 XYアクチュエータの開発

ウェハ全面を均一に成膜させるために、ウェハ全面に渡って千鳥状に動作するXYアクチュエータの開発を行った。XYアクチュエータの構造を図 2.10 に示す。アクチュエータはX軸Y軸ともストローク長 450mm とした。設置位置は、異物が成膜の部屋に入らないように成膜室の隣室にした。また同様の理由で、ウェハよりの低い位置に設置した。また危険源を隔離するために、アクチュエータのモーター部を窒素ガスでパージする構造とした。

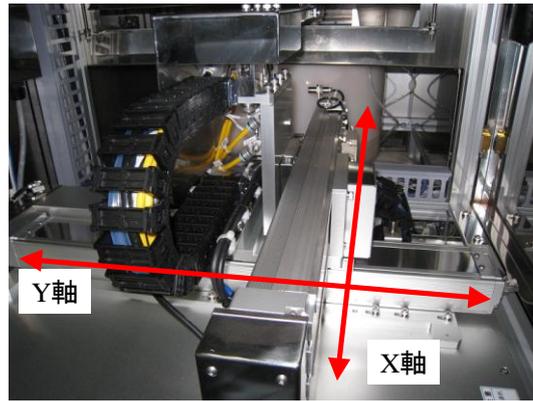


図 2.10 XYアクチュエータの構造

2-7 定量少量レジスト供給装置の開発

ウェハ全面を均一にレジスト成膜するために、レジスト液を $2\sim 20\text{ml}/\text{min}\pm 1\%$ の精度でノズルに供給する図 8 に示す低コストの定量少量レジスト供給装置を開発した。供給装置の内部には、シリンジポンプがありレジストを回転霧化式エアロゾルスプレーノズルまで供給している。またレジストとは別に 2 系統の洗浄液があり、それぞれ回転霧化式エアロゾルスプレーノズルのカップ洗浄とメインカップ洗浄に使われている。



内部に設置したシリンジポンプ

図 2.11 開発した定量少量レジスト供給装置

2-8 制御装置および通信装置の開発

2-8-1 成膜装置の制御装置の開発

本装置を一連動作させるための制御装置を開発した。制御装置は成膜装置の左部に設置されている。大きな役割としては、XYアクチュエータの動作の制御、メインカップ部の制御および安全に動作させるためのインターロック制御である。マンマシンインターフェイスは、タッチパネルで行う仕様とした。そしてCCリンクで各部と通

信する仕様とした。

2-8-2 回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの制御装置

回転霧化式エアロゾルノズルの制御は、成膜装置を制御する上で重要な技術である。今回、回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの制御装置をプリント基板化し、小型化を計った。さらに、川下ユーザの装置とのインターフェースを施すための通信仕様はデバイスネット、CCリンク仕様とし、基板設計は外注し、基板製作や通信等のソフトウェア作成は旭サナック株式会社が行った。開発した回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの制御装置を図 2.12 に示す。制御装置の外見寸法は、幅 230mm×高さ 120mm×幅 30mm で従来当社が用いている回転霧化式エアロゾルスプレーノズル制御装置のサイズは、幅 300mm×高さ 184.5mm×幅 90mm よりも大幅に小型化されている。制御できるノズル数も 4 ノズルまで対応している。通信も CC-Link 通信、Device Net 通信、Profibus 通信に対応している。価格においては従来の 70%を実現した。

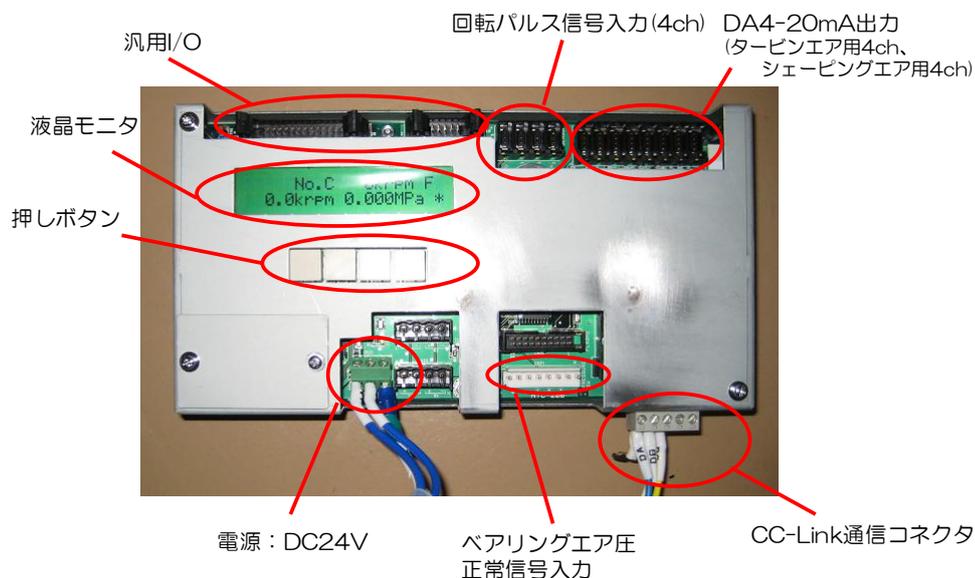


図 2.12 開発した回転霧化式エアロゾルスプレーノズルの制御装置

第3章 プロセスの研究開発

3-1 プロセスの研究開発の目標

試作した成膜装置で、TSV 壁面へのレジスト成膜のプロセス開発を実施した。プロセスの研究開発は、川下ユーザで安定した量産可能となる条件を見出すための、①飛行レジスト液滴特性と成膜特性の関係、ウェハの加熱温度と成膜特性の関係、②塗り重ね回数の影響、④レジスト濃度の影響を調査し、その結果に基づいてプロセスの研究開発を行った。

プロセスの研究開発は、国立大学法人九州大学と旭サナック株式会社で、実験環境の統一を図りながら実施した。

プロセス開発の目標としては、アドバイザーである東京応化工業株式会社から図 3.1 のような TSV 内のレジスト膜厚の要望があり、目標値とした。TSV 底部は、フォトレジストの最適露光量にするために膜厚 5~10 μm の膜厚が必要となる。もし膜厚が厚すぎる場合は、露光後の現像が困難になり、膜厚が薄い場合には、TSV の開口寸法の制御が困難であるという問題を持つ。また TSV の角部と表面には 5 μm 以上の膜厚が必要であり、膜厚が薄い場合、ドライエッチング時のロスにより、基板がダメージを受けると言う問題を持つ。

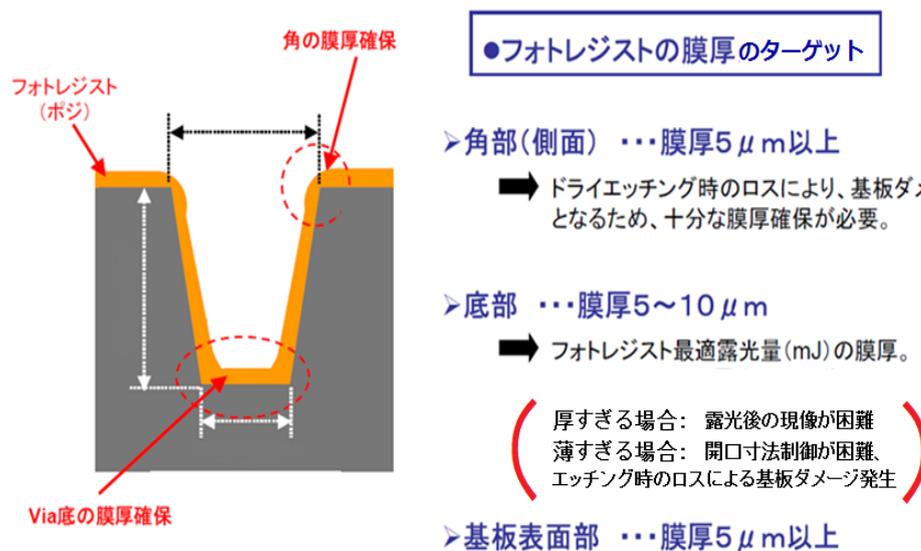


図 3.1 目標とする TSV 内のレジスト膜厚

3-2 TSV ウェハの最適成膜条件

いくつかの予備実験を基に、TSV ウェハの最適条件で成膜した。成膜は 2 回塗りとした。1 回目の成膜条件として、タービン回転数を 70,000 min^{-1} 、シェーピングエア圧力 0.19MPa、噴霧量を 7.9g/min、スプレー距離は 30mm、塗り重ねピッチは 5mm、ステージの温度は 40 $^{\circ}\text{C}$ 、2 回目の成膜条件として、タービン回転数を 60,000 min^{-1} 、シェーピングエア圧力 0.19MPa、噴霧量を 7.4g/min、スプレー距離は 30mm、塗り重ねピッチは 5mm、ステージの温度は 90 $^{\circ}\text{C}$ とした。いずれの成膜もレジストは東京応化製 LA900(10wt%)を使用した。

測定結果を図 3.2 に示す。間口径 80 μm から 40 μm の TSV では底面、側面、角部、表面ともに必要十分な膜が形成され、良好な状態である。間口径 30 μm から 20 μm では、TSV 内に成膜はされているものの、ビアごとに膜厚のバラツキがあった。現在、川下ユーザで使用している TSV の間口径は 60 μm から 80 μm と言われているので、製造プロセスで使用できると考えられる。しかしながら、将来的には TSV の間口径が小さくなっていくことが予想されるため、今後、レジストの種類を含め新しい条件を検討する必要がある。

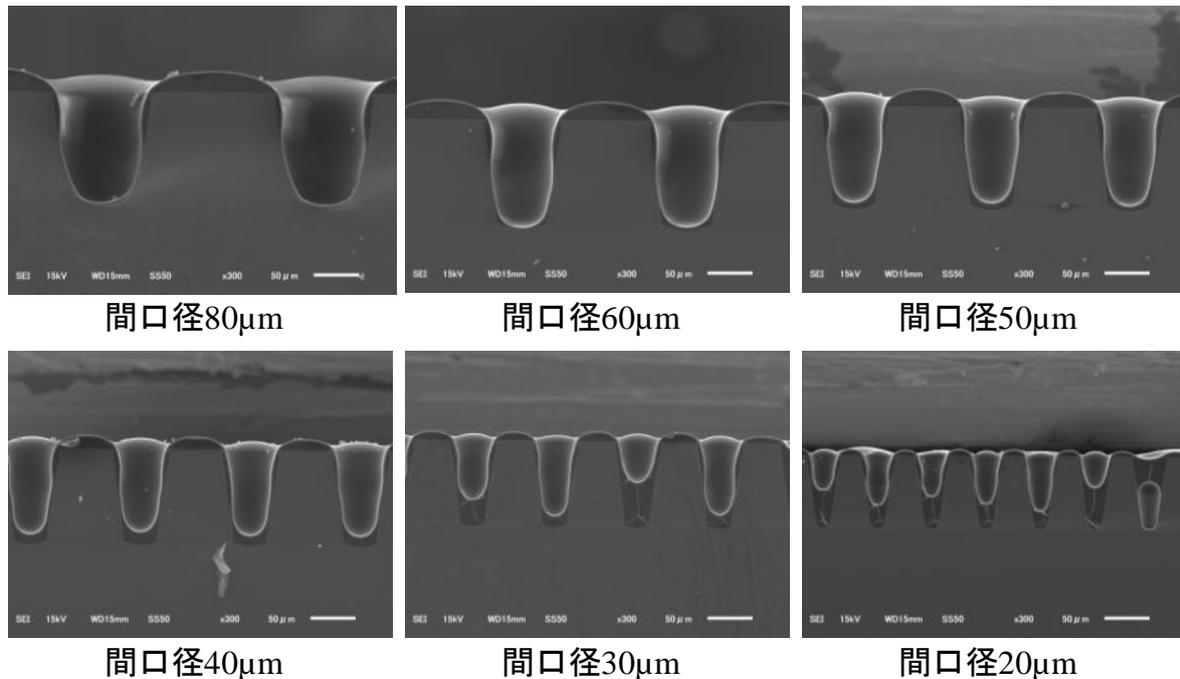


図 3.2 TSV ウェハの最適成膜条件

3-3 TSV ウェハの溝深さ影響確認

TSV ウェハの溝の形状や深さは川下ユーザや製造プロセスによって変わってくる。そこで、溝深さの影響について確認実験を行った。今まで評価した基板と比較するために同じ条件とした。使用した基板の間口径を 20 μm 、30 μm 、40 μm 、50 μm 、60 μm 、80 μm とし、深さを 250 μm と深くした。

今回は間口径 40 μm と 80 μm の TSV で評価した。1 回目塗布条件で成膜した場合、従来のウェハでは、開口径 40 μm 、80 μm とも底部に成膜され、80 μm 時は TSV 底部に 7 μm のレジストが成膜させた。それに対し、深溝タイプの間口径 80 μm の TSV では、側面部のみ成膜され、間口から 100 μm までしか成膜されていない。間口径 40 μm の TSV では間口径がレジスト膜によって潰れてしまっている。この現象は TSV が深いためにレジストがビア内に入らず、表面張力により発生した現象と推測する。

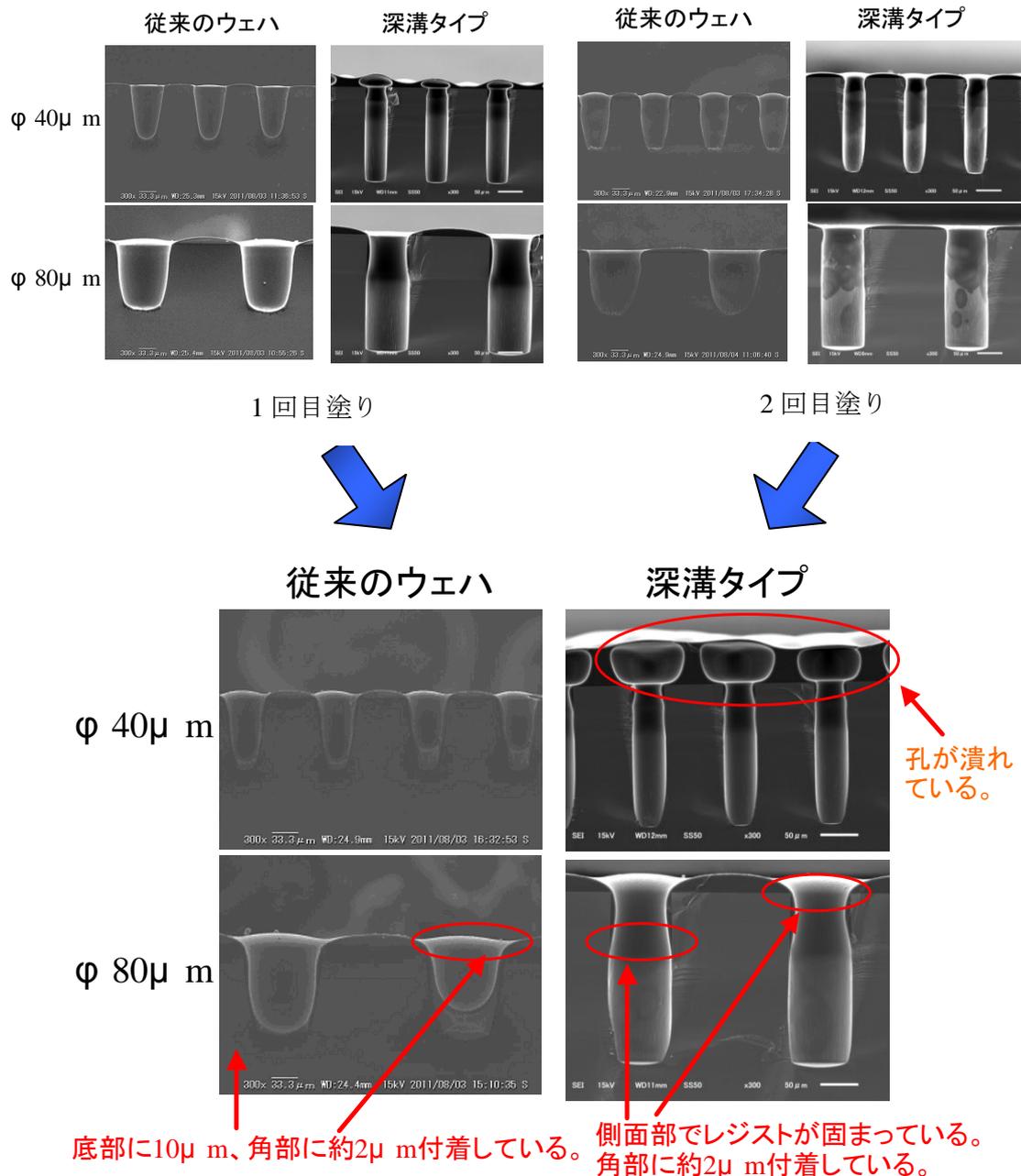
2 回目の塗布条件で成膜させた場合、従来のウェハでは表面、角部にレジストが成膜された。同様に深溝タイプでも表面および角部は成膜された。この現象は従来のウェハで成膜した場合と同様な結果であった。

1 回目と 2 回目の条件で塗り重ねた場合、従来のウェハでは良好な膜厚が得られた。しか

しながら、TSV 表面はレジストで覆われ、側面は間口径 100 μm までしか成膜されておらず、底部は全く成膜されなかった。今後、レジストの組成や塗り方を変えて、成膜する必要があることが分かった。

3-4 TSV ウェハ間口形状の影響確認

溝深さと同様に TSV の間口の形状も川下ユーザや製造プロセスによって変わってくる。例えば、図 1.1 (b)に示す 3D スタックの半導体デバイスは角型の TSV で構成されている。そこで、間口の形状の影響について確認実験を行った。今回使用するウェハの全体の写真を図



1回目と2回目での塗り重ね

図 3.3 TSV ウェハ溝深さの影響確認

3.4に示す。TSV 間口は角 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm で、深さは 100 μm で、50 μm のウェハとした。

塗布条件は、タービン回転数を 60,000 min^{-1} 、シェーピングエア圧力 0.19MPa、噴霧量を 6g/min、スプレー距離は 30mm、塗り重ねピッチは 5mm、ステージの温度は 40 $^{\circ}\text{C}$ で 1 回のみ塗布とした。塗布液は東京応化工業社製 LA900(10wt%)とした。

レジストを成膜した間口各タイプの TSV 断面を図 3.4 に示す。全ての間口に対してコンフォーマルに成膜されていることが分かる。成膜率は間口 50 μm で 7.5%、間口 100 μm から 200 μm は 100%であった。このように 50 μm の TSV はもっと条件をつめる課題を持つものの、現在川下ユーザで用いられている間口角型の TSV には成膜できることが分かった。

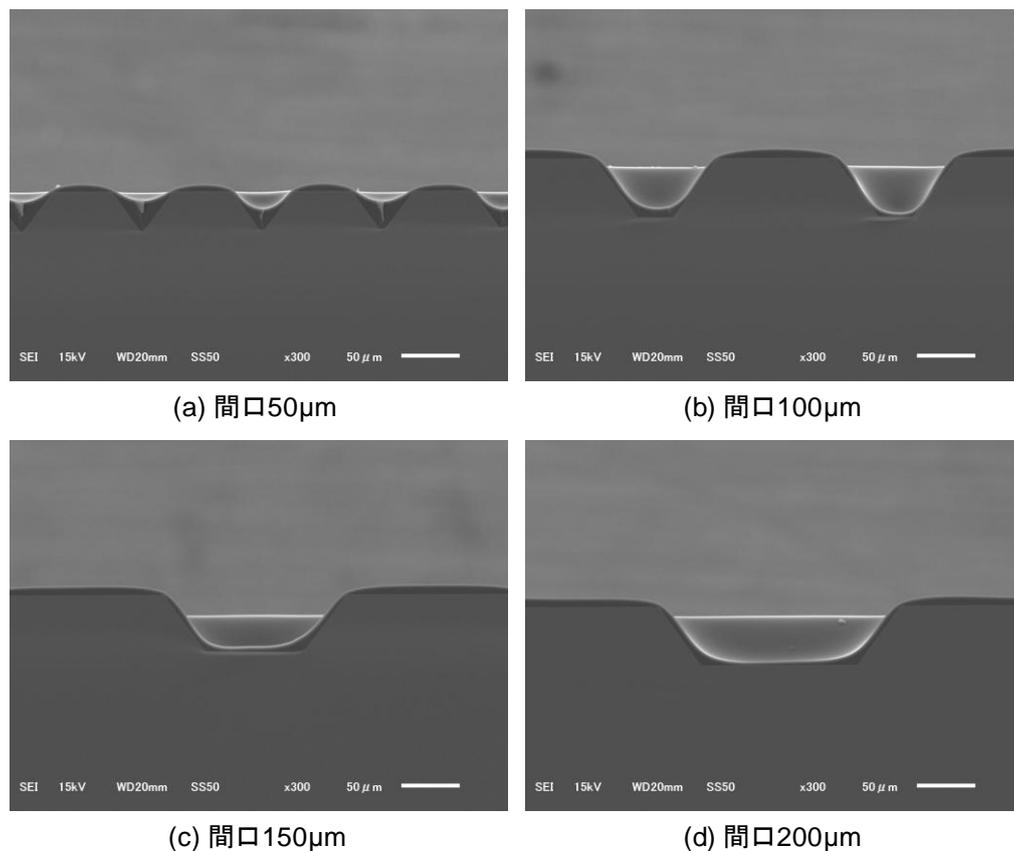


図 3.4 レジストを成膜した間口角タイプの TSV 断面

3-5 プロセスの研究開発のまとめ

本章では、試作した装置を用いてテストパターンを形成した TSV ウェハで成膜実験し、①飛行レジスト液滴特性と成膜特性の関係、ウェハの加熱温度と成膜特性の関係、②塗り重ね回数の影響、④レジスト濃度の影響を調査し、その結果に基づいて TSV ウェハの最適性膜条件で成膜をし、最適な条件を見出した。

次に、川下ユーザが使用する TSV 基板に対応するために、TSV ウェハの溝深さの影響と間口形状の影響を確認した。

第4章 成膜装置の安全性評価（SEMI規格審査）

4-1 SEMI規格の必要性

SEMI規格とは、半導体製造装置やフラットパネルディスプレイ装置および材料メーカーで構成された業界団体のガイドラインであり、半導体業界においては事実上国際標準に等しく扱われている。今回、環境、健康、安全に関する評価である SEMI S2、人間工学エンジニアリングによる安全評価 SEMI S8、および電気・電子機器から発する電磁妨害波の影響および他の機器、システムからの電磁妨害の耐性を確認する EMC(Electromagnetic Compatibility：電磁両立性)試験を第三者機関で受審して、成膜装置の不具合点を洗い出した。

4-2 SEMI S2, S8 による安全性評価

SEMI S2は半導体製造装置の環境、健康、安全に関するガイドラインである。審査は SEMI規格のほかに EU 機械指令 2006/42/EC Annex I の対象となり、電機安全については EN60204-1 が適応される。また米国向けの電気安全は NFPA79 が適応される。

SEMI S8は半導体製造装置の人間工学エンジニアリングに関する安全ガイドラインである。手順として、まず SEMI のガイドライン毎に、リスクアセスメントを実施し、その項目別に成膜装置の危険源を洗い出し、危険のレベルが低減するような設計を行った。

図 4.1 は第三社機関で成膜装置の審査を受けている様子である。受審の結果 8 項目が要求から外れており、評価するために 14 項目で情報が不足であり、この内容に基づき成膜装置をより安全性の高いものにする。

4-3 EMC(Electro-magnetic compatibility)評価

電気・電子機器から発する電磁妨害波の影響および他の機器、システムからの電磁妨害の耐性を確認する EMC(Electromagnetic Compatibility：電磁両立性)試験を第三者機関で受審した。

エミッション試験においては、制御盤内の配線方法の変更や電磁波防止のためのフェライトコア等を取り付けることで条件付パスとなった。



図 4.1 第三者機関で SEMI S2, S8、EMC 試験の審査を受審している様子

第5章 ナノインプリントを用いた新しいTSV評価方法の確立

5-1 研究目的

第2章で行ったプロセスの研究開発では、試作した成膜装置でTSVにレジストを塗布し、塗布したウェハを割って、ビアの断面を電子顕微鏡で観察を行った。しかし本検査方法は破壊検査であり、川下ユーザでは非破壊でビア内の膜厚・形状を計測できる評価方法が切望されている。そこで本章では、ビアホール内の膜厚・形状等を非破壊で観察評価するため、ナノインプリント（高精細転写）を適用する新しい計測評価法を提案し、確認実験を行った。

5-2 TSV ウェハとビアホール内の非破壊計測法の提案

ナノインプリント用の印像材にはPDMS（信越化学工業製SIM-360）を用いた。スプレーしたレジスト膜厚は、走査型電子顕微鏡で評価する。レジスト膜厚・形状評価プロセスは、下記のとおりである。

- ① レジストスプレー前のTSV ウェハのビア原型にPDMS を流し込み（注型）・脱型（離型P版）、
- ② P版の保管/形状評価、
- ③ TSV ウェハにレジストスプレー（前報3）参照）、
- ④ レジストが成膜されたTSV ウェハにPDMS 注型・転写し脱型（離型R版）、
- ⑤ R版の保管/形状評価、
- ⑥ P版とR版の形状比較・評価からレジスト膜厚算出。

PDMS の作製とその攪拌方法、ならびにウェハ面状への注型と脱型方法を、それぞれ図5.1に示す。まず、主剤と硬化剤を定められた比率にて計量→主剤と硬化剤を同じ容器に添加→バターナイフ状ヘラで攪拌→数回の減圧脱泡する。その後マスター（ウェハ）にPDMS を注入→数回の減圧脱泡→数10分程度放置・硬化→脱型、と極めて簡単なプロセスである。

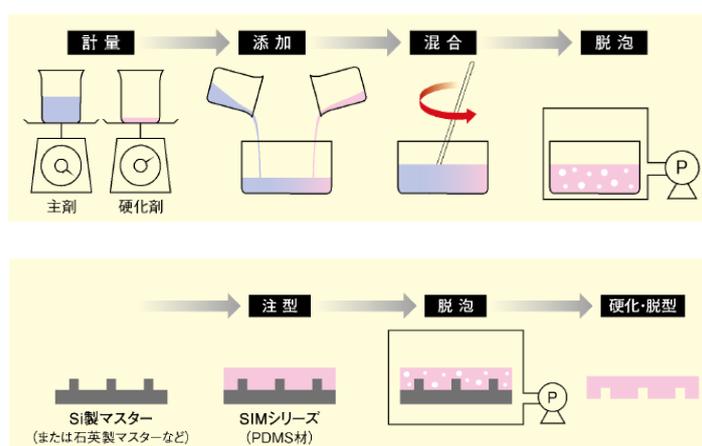


図5.1 ナノインプリント製作方法

5-3 実験結果および考察

図 5.2 に、ポジ型レジスト成膜前のPDMS 離型P 版の写真を示す。図5.3 は、ポジ型レジスト膜成膜後のPDMS 注入硬化後の離型R 版を示す。ここで注目すべきことは、レジストを剥がすことなく離型出来ていることである。また、ここでは詳細を述べられないが、離型P 版と離型R 版の画像合成法を考案し、この手法からTSV 表面と角部膜厚を正確に算出できることを確認している。例えば、図6.4 より成膜前のビアの高さは $92.38\mu\text{m}$ 、図5.2よりレジスト膜の厚さを含む高さは $103.09\mu\text{m}$ である。これにより、ポジ型レジスト膜の底部膜厚を算出すると $10.71\mu\text{m}$ となる。さらに本手法が正しい形で成型されているか確認するために、TSV ウェハを割り断面をSEM で観察した。図5.4 ならびに図5.5 に、TSV ウェハのポジ型レジスト成膜前後の断面SEM の写真を示す。この断面SEM より高さが $92.44\mu\text{m}$ であり、図5.2の成膜前のPDMS 離型処理後の高さと同様であることを確認した。また、底部膜厚は、 $10.67\mu\text{m}$ であり、その差 $0.04\mu\text{m}$ であることから転写精度が極めて良いといえる。同様にして、TSV ウェハ上でランダムに採取したレジスト底部膜厚のSEM 観察とナノインプリントによる両者を比較して、その相関を調べると図5.6が得られた。この図から、提案する非破壊ナノインプリント転写法は、 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 前後の精度でビアホール内の形状を評価することができると考える。一方、図5.7は、ナノインプリントによる成膜欠陥を検出した一例である。これより、レジスト膜の穴潰れ現象を的確に目視可能な判断出来る。以上より、提案するナノインプリント転写法は、レジスト膜形成ビアホール内の膜厚値とほぼ同じで致命的な収縮もなく、高い精度の計測が実現可能であることを立証できた。

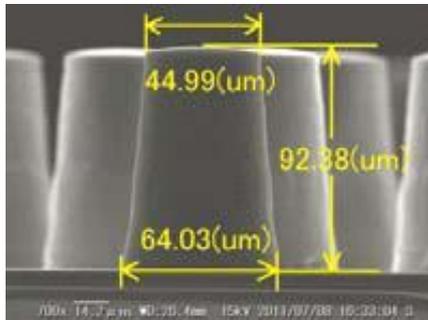


図 5.2 成膜前の離形 P 版

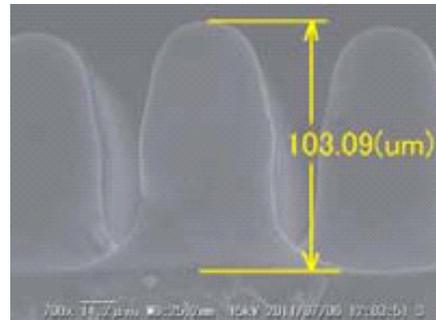


図 5.3 レジスト成膜後の離形 R 版

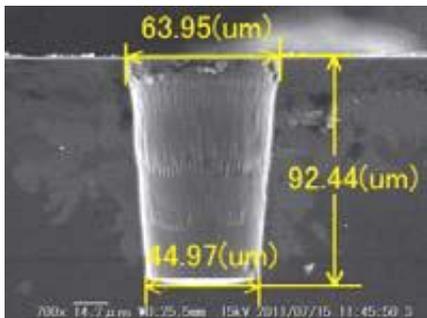


図 5.4 TSV ウェハの原型断面

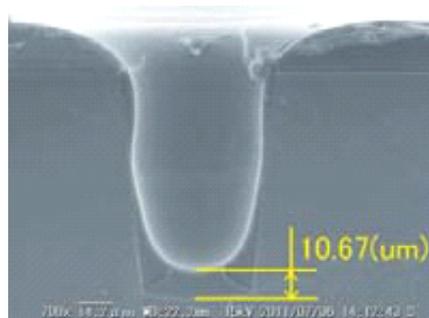


図 5.5 レジスト膜成膜後の原型

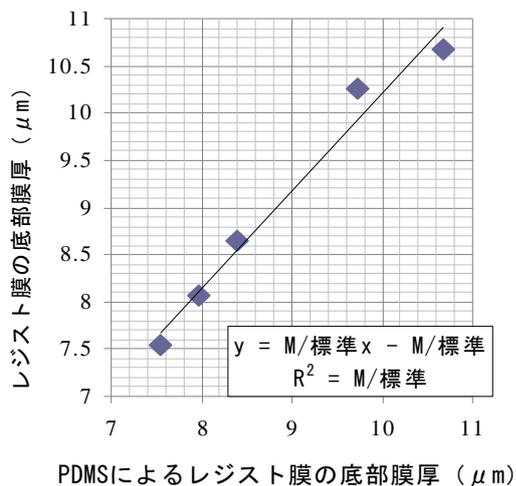


図 5.6 電子顕微鏡観察とナノインプリント法から求めたレジスト膜厚との相関

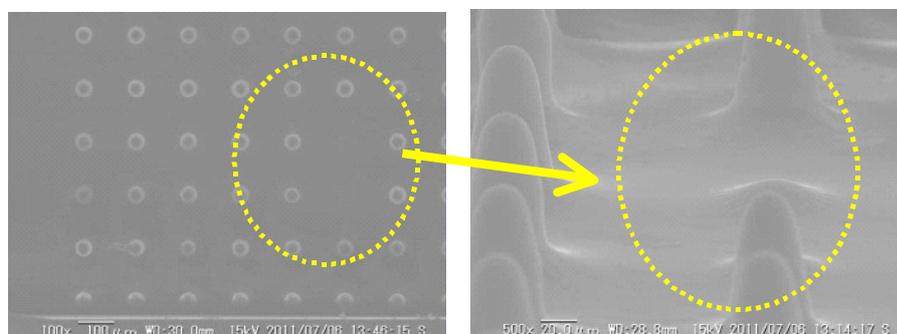


図 5.7 レジスト膜の穴潰れの欠陥

5-4 まとめ

三次元スタック構造デバイスのTSV 形成プロセスにおける回転霧化式スプレーによるTSV ビア内の成膜研究の一環として、ビアホール内の膜厚・形状等を非破壊で観察評価するため、ナノインプリント（高精細転写）を適用する新しい計測評価法を提案・検討した。以下、得られた結果を要約すると、

- 1) 提案するPDMS を用いたナノインプリント転写法は、概略40~80x100μm のTSV ビア内の形状を忠実に転写することができる。
- 2) レジストを形成した膜も剥がすことなく離型でき、レジスト成膜前後のPDMS 転写形状から、レジストの膜厚測定に適用できる。
- 3) 提案のナノインプリント転写法による膜厚とSEM 観察による膜厚の相関により、±0.2μm 前後の精度と信頼性が高いことを確認した。

第6章 川下ユーザでの生産プロセスでの評価

試作した成膜装置を用いて川下ユーザの実験を行った。今回用いた基板は、間口径 60 μm 、溝深さ 100 μm でテーパのないものとした。評価して頂いた結果を図 7.1 に示す。実験条件は第 4 章のプロセスの実験結果より 2 回塗りとした。その結果、A 社で満足いく結果となった。また現像工程でも回転霧化式エアロゾルスプレーによって良好な結果が出た。

第7章 全体総括

7-1 成果の総括

本研究の成果を統括する。本研究は、第 2 章で、回転霧化式エアロゾルスプレーによる成膜装置を 2 台試作した。そして試作した装置は、①回転霧化式エアロゾルスプレーノズル、②静電発生装置、③ウェハ用ホットプレート、④メインカップおよび廃レジスト回収装置、⑤XYアクチュエータ、⑥定量少量レジスト供給装置、⑦制御装置および通信装置を搭載した。それぞれ搭載された要素技術について、その特性評価をした。

第 3 章では、試作した装置を用いてテストパターンを形成した TSV ウェハで成膜実験し、①回転霧化式エアロゾルスプレーからの飛行レジスト液滴特性と成膜特性の関係、ウェハの加熱温度と成膜特性の関係、②塗り重ね回数の影響、④レジスト濃度の影響を調査し、その結果に基づいて TSV ウェハの最適性膜条件で成膜をした。

次に、川下ユーザが使用する TSV 基板に対応するために、TSV ウェハの溝深さの影響と間口形状の影響を確認した。さらに、レジストの膜厚分布の分析を実施し、仕様書通り、平坦に成膜することができることを確認した。

第 4 章では、川下ユーザに安全に使用して頂くために、試作した成膜装置を用いて、第三者機関で半導体製造装置の安全規格となる SEMI S2（半導体製造装置の環境・健康・安全のガイドライン）および SEMI S8（半導体製造装置の人間工学エンジニアリングに対する安全ガイドライン）および EMC (Electro Magnetic Interference; 電磁環境適合性) の審査を受審し、一部修正は必要となるものの安全に使用できることを確認した。

第 5 章では、三次元スタック構造デバイスの TSV 形成プロセスにおける回転霧化式スプレーによる TSV ビア内の成膜研究の一環として、ビアホール内の膜厚・形状等を非破壊で観察評価するため、ナノインプリント（高精細転写）を適用する新しい計測評価法を提案・検討した。

第 6 章で試作した成膜装置を川下ユーザにご評価頂き、本技術が TSV 製造工程に有効であることを確認した。

7-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況

対外発表として以下の 2 件の発表を行った。

- 1) 清家善之、小林義典、宮地計二、島井太、丸山健治、佐藤晶彦、土肥俊郎、黒河周

平、大西修、大坪正徳: 3D スタックデバイスの製造工程における TSV 内レジスト成膜に関する研究—第 1 報 新しい TSV の成膜方法の提案とその装置化について—, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, P153

- 2) 土肥俊郎、大坪正徳、黒河周平、大西修、畝田道雄、宮地計二、清家善之、丸山健治、小谷卓司、大橋建: 3D スタックデバイスの製造工程における TSV 内レジスト成膜に関する研究—第 2 報 : TSV パターンのナノインプリント転写による計測と応用—, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, P155

7-3 今後の事業化に向けた取組み

本研究はまだ研究開発の段階であり、成膜装置の安定性の問題、成膜装置のコストの問題、プロセスの安定性の問題を解決する必要がある。今後、川下ユーザやアドバイザーとともに研究開発を続け、川下ユーザの生産プロセスでご使用頂く。