平成 29 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

「微細パターンの基板に対応した真空差圧式レジスト剥離、

エッチング装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局

関東経済産業局

補助事業者よこはまティーエルオー株式会社

一目次一

第1 1-1 1.	章 研究開発の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 5
2. 1-2 1. 2.	研究目的及び目標 研究体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
З.	協力者	
1-3 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7.	成果概要 真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発 2流体噴射処理技術の開発 ケミカル処理によるレジスト剥離プロセスの確立 バックエッチングプロセスの確立 半導体製造工程における開発装置の総合的な機能・動作・性能の評価 アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明	7
1-4 1. 2.	当該研究機関の連絡窓口 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
第 2 2-1 1. 2. 3. 4.	2章 本論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	0
5.	探作シーケンスの 開発	

2-2	2流体噴射処理技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
2-3 1. 2	・ケミカル処理によるレジスト剥離プロセスの確立 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
∠.		
2-4	バックエッチングプロセスの確立 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
1.	評価方法	
2.	実験内容及び評価結果	
2-5	・半導体製造工程における開発装置の総合的な機能・動作・性能の評価・・・・・・・・・・	46
2-6	アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製・・・・・・・・・・・・	46
1.	微細深溝パターンを形成した小口径半導体ウェーハ	
2.	テストプロセス処理が施された「微細深溝パターンを形成したウェーハ」のパーティクル残渣	評価
2-7	~ 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明 ・・・・・・・・・	48
1.	窒素ガス噴流によるウェーハ上の圧力分布測定	
2.	圧縮性 Navier-Stokes 方程式を基礎とした装置内の気流解析	
З.	Boltzmann 方程式を基礎とした DSMC 法による微細溝内の気流解析	
第3	3章 複数年の研究開発成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
3-1	平成 27 年度の研究開発成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
1.	真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発	
2.	2 流体噴射ノズルの開発	
З.	超音波振動子付きロータの開発	
4.	アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製	
5.	微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明	
3-2	2 平成 28 年度の研究開発成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
1.	真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発	
2.	2 流体噴射ノズルの開発	
З.	超音波振動子付きロータの開発	
4.	アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製	
5.	微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明	

第4章研究開発後の課題・事業化展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•• (51
4-1 研究開発後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•• (51
1. 同一装置でレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理をする装置		
2. スピンコーターへの応用		

61

- - 1. 同一装置でレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理をする装置

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

半導体製品は医療機器、航空宇宙機器、自動車、情報通信機器、ロボット、産業機器、エネルギー・ 電力変換機器などの必須部品であり、精密加工技術は半導体製品製造の根幹技術である。半導体製品分 野では、従来のウェーハの大口径化/スケールメリットを追求した技術開発の方向とは別に、センサオ ンチップなど MEMS 製品の電子回路、SiC や GaN スイッチング素子、カスタム IC 等の高機能・高付 加価値、多機能・多品種、少量生産システムに対するニーズが急速に大きくなってきており、この分野 では、これら製品の生産システムには小口径ウェーハ加工が適している。小口径ウェーハ加工において は、製造プロセス(レジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥)に対して、製品のコスト低減、生 産性向上、また、多機能・多品種生産の要求がある。

2. 研究目的及び目標

半導体製造業者に関して、以下の課題とニーズがある。これらの要求に応えるため、本研究開発は、 小口径ウェーハを加工する常圧と真空の差圧を利用したレジスト剥離・エッチング装置を設計・製作し た。開発した装置はレジスト剥離の効率化、洗浄・乾燥処理の高速化、さらにはバックエッチングも同 一装置で実現し、従来装置の問題点を解決することができた。

(1) 高機能化·精密化·軽量化

次世代スイッチング素子等 SiC(炭化ケイ素)や GaN(窒化ガリウム)は、機械的に脆く、小口 径の化合物半導体ウェーハを精密加工するプロセスの開発が望まれている。また、シリコン製品の高 機能カスタム IC を製作するために、小回りの利く半導体製造プロセスの実現が望まれており、小口 径ウェーハ対応の高精密加工プロセスの開発に対するニーズがある。

(2) 品質の安定性・安全性の向上

レジスト剥離処理は、従来のケミカルの方法では深溝に対応できず、アッシング装置を用いプラズ マあるいはレーザーでレジスト材を炭化させる剥離処理を行っている。この方法では装置が高価であ るとともに、基板の微細パターン内の光が照射されない部分の剥離処理ができず、パターン内からの レジスト剥離残渣の除去が困難である。

本研究開発はコストの安いケミカルの処理法を用いアスペクト比20:1の深溝内の100nm サイズの残渣パーティクルの数が1溝(長さ1mm程度)に2個以内を実現する装置を開発した。 (3) 生産性・効率化の向上、低コスト化

特殊加工工程を含む小口径ウェーハの微細加工工程の高効率化、高速化、製品の低コスト化 を実現するためには、レジスト剥離工程において、剥離剤を使用した後、速やかに洗浄・乾燥を行う ことが肝要である。

レジスト剥離後に製品回路基板への密着性、実装密度、基板の厚みの均一化向上のため微細加工したウェーハの裏面をエッチングする工程がある。

加工システム全体としてのコストを下げるためにレジスト剥離、バックエッチング、洗浄、乾燥を同一装置でできることが望まれる。

1-2 研究体制

1. 研究組織・管理体制

本研究開発体制は、戦略的基盤技術高度化支援事業の補助金の交付決定を受けた補助事業者(事業 管理機関)であるよこはまティーエルオー株式会社が、研究開発に携わる間接補助事業者(研究機関) のミクロ技研株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人横浜国立大学を管理し、 全体の事業を推進した。なお、よこはまティーエル株式会社は、研究開発を担う研究機関も兼任した。



2. 研究者氏名

【研究実施機関】 ミクロ技研株式会社

氏名	所属・役職	備考
岸本 昭夫	開発部 主査	統括研究代表者(PL)
湯川 孝一	開発部 技術顧問	副統括研究代表者(SL)

【研究実施機関】 国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
安藤 淳	ナノエレクトロニクス研究部門・総括研究主幹

【研究実施機関】 国立大学法人横浜国立大学

氏名	所属・役職
松本裕昭	大学院工学研究院システムの創生部門・教授

【研究実施機関】 よこはまティーエル株式会社

氏名	所属・役職
塚本 修巳	特別顧問
藤本 郁夫	プロジェクト推進部門・担当

3. 協力者

【アドバイザー】 富士電機津軽セミコンダクタ株式会社

氏名	所属・役職
井上 弘志	津軽工場を製造部を装置管理課・課長
西村隆之	津軽工場を製造技術部を装置技術課・主任

1-3 成果概要

1. 真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発

レジスト剥離、バックエッチング、洗浄の処理動作を3つの2流体ノズルを切替えることによって、 乾燥まで含め1台の装置で行うことが可能になった。処理できる基板サイズは「φ3、φ4、φ6、φ8inch ウェーハ」及び「ロ152mm フォトマスク基板(6025)」である。本研究開発では主にφ4inch ウェーハ を使って実験、評価を実施した。

減圧下で処理を行う真空チャンバは 2 流体ノズルの回転軸の旋回・昇降動作を伴うためシール性に加 えて摺動性が要求されるが、-70kPa の真空圧を達成した。酸を使用するので真空チャンバ内面含め接 液部や部品は PFA コーティング等のフッ素樹脂あるいは PEEK 材を用いた。またウェーハを超音波加 振(45kHz と 100kHz)するための超音波振動子の開発、回転ロータの設計・製作及び回転数 500rpm までの使用に耐えるスリップリングを開発し、問題ないことを確認した。プロセス条件をレシピ設定し手 動・自動運転等、操作シーケンスの開発も完了した。

2.2流体噴射処理技術の開発

レジスト剥離液またはエッチング液をN2ガスと同時に注入し均一に噴射する2流体ノズルを設計、製作した。噴射口を設けたシャッタ及びノズルキャップと称する部品だけ簡単に取外しできるようにしており、ノズル本体を全交換しなくても噴射状態の最適化を行うことができることが最大の特徴である。初期設計の噴射口寸法の流体解析において気体の噴射速度=500m/sec(マッハ1.5)程度となる結果が得られたので、本研究開発では最適化の検討までは着手しなかった。

噴射口直前に設けられた混合室では液体と気体が押し合うために、各々の流量が大きくなると設定流量からずれる傾向がある。このような流量特性を把握した上で気体流量=10L/min(@0.4MPa)、液体流量=0.2Lmnin(@0.25MPa)を基本条件として設定し実験・評価を実施した。

アスペクト比 20:1 の深溝パターンについては、本装置における2流体最大流量(気体(N₂)流量 =40L/min、液体流量=0.8L/min)で噴射を行ってもチッピング等の損傷発生が無いことを確認した。 3. ケミカル処理によるレジスト剥離プロセスの確立

アスペクト比 20:1 の深溝パターンのレジスト剥離において 2 流体ノズル噴射、超音波加振及びその 組合せ等の処理条件で実験を行い SEM、AFM 等を用いて深溝内のレジスト残渣の評価を行った。

輸送中の追加汚染を防ぐためパターン形成後に保護レジストを塗布した。使用した保護レジストは AZ5214(Clariant 社製)及びgL2000(MicroChem 社製)の2種類で、それぞれに対し剥離液はアセト ンと NMP を用いた。減圧下における 2 流体ノズル噴射、超音波加振及びその両方適用条件において目 標値の「長さ 1mm の溝 1 本当たり 100nm サイズのパーティクル数 2 個以下」が達成できる見通し が得られた。2 流体噴射によってパターンの損傷はなかったが、超音波を直接照射するとパターンの損 傷・破壊が発生したのでウェーハ裏面から間接照射する条件が妥当であることを検証した。深溝の気流の 数値解析では、圧力差を与えると上昇気流が誘発される結果が得られ残留パーティクル除去の可能性が示 された。

4. バックエッチングプロセスの確立

Si ウェーハの酸化膜の除去を目的として 5wt% HF(フッ酸)でエッチングを検討した。SiO₂ 終末端の 水酸基(-OH 基)がエッチングされると疎水性をもつ水素終端(Si-H)が現れると推察できることから、酸 化膜が除去されたかどうかは純水の接触角の変化によってチェックした。減圧雰囲気下でフッ酸 2 流体 噴射時間=1 分の処理によって約 0.2 µm エッチングされ、接触角が 20°から 50°に増加した。また エッチング前後の平坦度(反り量)はウェーハの面圧分布をタクタイルセンサシステム(ニッタ社製)で測定 し、円板のたわみの式を用いて算出した。実験の結果、「エッチング前後の平坦度変化が 0.3%以下」の 目標に対して、反り量/板厚が約 0.2%となることを検証した。

なおウェーハの板厚を短時間で薄くする高速バックエッチングプロセスへの応用については HF/HNO₃/CH₃COOHの混酸を使って検討したが、平坦度評価以前にウェーハ内のエッチング量分布 が極めて大きく本研究開発装置で実施する2流体噴射による高速流だけでは容易ではないと考える。

5. 半導体製造工程における開発装置の総合的な機能・動作・性能の評価

同一装置で「レジスト剥離→洗浄→乾燥」及び「バックエッチング→洗浄→乾燥」の処理動作を行う装置を開発し、アスペクト比 20:1 の深溝パターンのレジスト剥離及び Si ウェーハの酸化膜除去エッチングにおいて本研究開発目標をクリアした。この成果により「レジスト剥離〜バックエッチング〜洗浄→ 乾燥」の装置台数は8台から5台に削減が見込まれ、高品質・低コストの半導体製造プロセスの実現に 寄与できる。

平成28年4月6日に Photomask Japan 2016 で本研究開発のプレゼンを行った。翌平成29年 6月7~9日には JPCA Show 2017 でポスター展示を行った。さらに平成30年2月8日付の電子 デバイス産業新聞に紹介記事を掲載する等、事業化に向けた取り組みも進めてきた。顧客毎のパターンの サンプルワークを実施し、これまでに寄せられた要望に応えながら開発活動を継続し、実績を積み上げて いきたいと考えている。

6. アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製

「微細パターンの基板に対応した真空差圧式レジスト剥離、エッチング装置」の試作評価に不可欠である「微細深溝パターンを形成したウェーハ」の基本作製プロセスを確立し、「微細深溝パターン付ウェーハ」および「微細深穴パターン付ウェーハ」を作製するとともに、剥離試験用レジストを塗布してミクロ技研株式会社に提供し、補助事業実施の支援を行う。微細深溝パターンの寸法については、幅1 μm、アスペクト比=20:1を、微細深穴パターンの寸法については、直径1μm、アスペクト=20:1を目標とする。

微細深溝パターン基板を用いた試作装置の性能評価手法を構築し、各テストプロセス処理が施された 「微細深溝パターンを形成したウェーハ」のパーティクル残渣評価を通じて試作装置における開発目標 の達成率評価に寄与し、補助事業実施の支援を行う。

7. 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明

実機を模試した実験装置により、窒素噴流時のウェーハ上の圧力分布を測定した。その結果,僅かに容 器内圧力よりも低い圧力となる領域があることを確認し、残留物の除去の可能性を示すことが出来た。

上記の結果から残留物の除去は、容器内を減圧することが有効であると予想されたため、容器内を減圧 した際の微細溝内の流れを DSMC 法により非定常解析した。その結果、容器内圧力の減少に伴い、微細 溝内から気体が流出し、残留物が除去される可能性を示すことができた。

1-4 当該研究機関の連絡窓口

1. 統括研究代表者

ミクロ技研株式会社 開発部 主査 岸本 昭夫 TEL 03-3668-8131 E-mail a-kishimoto@micro-eng.co.jp

2. 事業管理機関

よこはまティーエル株式会社 プロジェクト推進部門 藤本 郁夫 TEL 045-339-4441 E-mail fujimoto-ikuo-sx@ynu.ac.jp 第2章 本論

2-1 真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理技術の開発

レジスト剥離、バックエッチング及び洗浄の3つの処理動作を1つの装置で行うための機構を開発・ 設計し試作装置を製作する。さらに処理ノズル切替え等のシーケンスを開発し、目的とする処理動作がで きるようにする。

処理できる基板サイズは、3~8インチ径ウェーハ及び152mm角フォトマスク基板とした。

1. 開発する装置の動作原理

共同申請者の株式会社イリオスは密閉された装置の処理室内部への超音波振動の導入と2流体(処理液 +N₂ガス)噴射によるレジスト剥離処理を行うことを基本とした技術(特願2015-063956)を持ってお り、上記プロセスの実現可能性を検証している。

図 2-1-1 に本研究開発装置の動作原理を示す。真空ポンプに接続された減圧タンク内のローターチャンバーにウェーハが装着され、ノズルから噴霧された流体はローターの回転、真空ポンプによるタンク内気体の吸引によりロータースリットからタンク外に排出される。この時、噴霧された N2単独、処理液単独あるいは2流体(処理液+N2)はウェーハ表面に沿って高速で流れる。

この高速流により溝内に渦流が誘起され、ウェーハの深溝中のパーティクルが撹拌され外に除去することが本研究開発の動作原理である。溝内のパーティクル除去をさらに促進するためにウェーハを超音波振動する方法も追加検討する。

ローターの回転は減圧を利用するため低速(500rpm 以下)で乾燥できる。したがって脆弱な基板に対しても安心に利用できる。



図 2-1-1 本研究開発の動作原理(原案)

2. 減圧チャンバの設計・製作

2流体ノズルから噴射される気液混合物が減圧チャンバ内に充満するので、液滴を含んだ気体の吸引に 最適な耐食性に優れる樹脂製ケーシングとステンレス製インペラの水封式真空ポンプを選定した。水封式 真空ポンプを使用することにより、エッチング液等は一度水に置換され排気される。このようにエッチン グ液を使うので、減圧チャンバ及び真空ポンプ前段に配置したセパレータ等の接液部はすべて PFA コー ティングを施した。2流体ノズル及び乾燥ノズルは別システム、別系統とした。

減圧チャンバ内にあるウェーハを回転し、超音波振動子のケーブルを配線する等のためには、まずリー クが少なくなるようなシールの設計が重要になる。リーク対策は O リングを使ったが、特に摺動する部 位の材質は PTFE とした。PTFE 以外の材質を試したが、Stick-Slip のためスムーズな摺動ができなか った。図 2-1-2 に減圧チャンバに組付ける部品の構成を含めた O リング使用箇所を示す。ハッチング 部分が減圧される範囲である。PTFE 製 O リングは、ノズル回転軸とノズルフランジの間に使用した。 なおスピンドルと軸受との間に O リングの代わりにオイルシールを使用した実績が株式会社イリオスに ある。発塵対策という点では磁性流体シールが最も望ましい。



図 2-1-2 減圧チャンバのシール箇所

2 流体ノズルの昇降・旋回動作と干渉しないように、乾燥ノズルはチャンバフタに固定した。フタを閉めた時の乾燥ノズルとワークとの間隔は約 100mm である。

また超音波加振を行う条件ではロータ内に液が無い「空焚き」が厳禁であるので、チャンバフタに液面 レベルセンサをインターロック用に取付けた。 図 2-1-3 に2流体ノズル、乾燥ノズル等を取付けた減圧チャンバの処理部の外観写真を示す。



図 2-1-3 処理部の外観

図 2-1-4 に減圧チャンバの圧力特性を示す。プロセス最大流量である乾燥ノズルからの吹出し時にお いてもチャンバ内の減圧状態は保たれることを確認した。



図 2-1-4 チャンバの真空圧特性

3. 超音波振動子付きロータの開発・設計・製作

ウェーハを超音波振動させることにより微細パターンの内壁に付着したレジスト剥離残留物が引き剥がされ、剥離効果を高めることができる。

超音波加振用には 28kHz、45Hz および 100kHz の3つの周波数をもつ超音波振動子を本装置用に 共同開発・改造し、45kHz と 100kHz の 2 周波を順次繰返し発振するようにした。この超音波振動子 を底面に装着した下ロータの外観を図 2-1-5 に示す。ロータは上ロータと下ロータと呼ぶ 2 個の部品 から構成され、外縁部に約 3mm のすき間(スリット)があいている。図 2-1-1 の動作原理で述べたよう に、このすき間からウェーハ上の高速流がスムーズに排出される。本研究開発では「 \$\phi 3、\$\phi 4 及び \$\phi 6inch 用」と「 \$\phi 8inch 及び口152mm 用」の 2 種類のロータを製作した。図 2-1-5 は前者の下ロー タの写真である。

ロータ回転中に超音波加振を行うためスリップリングも必要になる。電圧 AC600V、定格電流 10A(1 回路当たり)、最大回転数 500rpm の仕様のものを特注開発した。 図 2-1-6 に外観写真を示す。 万一の 発火に備え、 スリップリングをボックスで囲って N₂パージ機構とした。



図 2-1-5 ロータ底の超音波振動子の外観



図 2-1-6 スリップリングの外観

図 2-1-7 にウェーハをセットする側から見たロータの写真を示す。定在波の波長を考慮し、液深が 50mm となるように設計した。ウェーハは PEEK 製のチャック爪によって挟み込んでセットする。



図 2-1-7 ウェーハのチャック方法

4. 乾燥ノズルの設計・製作 (特開 2017-171540 及び特開 2017-175870)

ヒータから吹出す乾燥用 N2 は清浄度が要求されるため、流路と加熱部を別々にした構造を設計した。 図 2-1-8 に外観を、図 2-1-9 に構造(断面図)を示す。 ヒータの熱を伝導し N2 に熱伝達するための複数 のフィンがシェルに収納されている。フィンとシェルの内面との間に隙間を設けてあり、N2の流れを阻 害し滞留させる構造としている。

この設計の優位性を検証するために流体解析を行った。図2-1-10に温度分布、図2-1-11に流速分 布の解析結果について、本実施例と比較例を並べて示す。フィンのある方が吹出し温度が高い結果となっ た。フィンによって N2 がシェル内で滞留する様子も確認され、本研究開発で採用した構造の熱効率が高 くなる理由が説明できる。



図 2-1-8 乾燥ヒータの外観





(a) 本実施例

図 2-1-10 温度分布の解析結果





ヒータで加温した Hot N₂をガスフィルタ(耐熱 120℃、ろ過精度 0.01 µm、0.03 個/L 以下)を介し て乾燥ノズルからウェーハに向けて吹出す。乾燥ノズルの吹出口は図 2-1-12 に示すようなスリット形 状とし、吹出し方向の調整と吹出し流量を簡単に均一化できるように乾燥ノズル内部に仕切板を用いる構 造とした。

図 2-1-13 に仕切板の位置を変えた時の流体解析結果例を示す。スリット長さや本体形状を変更せず に仕切板の位置によって最もウェーハの乾燥に適した吹出し方向と均一な風速を設定することができる。 図 2-1-14 に № 流量 100L/min、ヒータ温度設定 100℃の場合のヒータ加熱時間と吹出した № の実 測温度との関係を示す。



図 2-1-12 乾燥ノズルの構造



図 2-1-13 仕切板の位置による流速分布



図 2-1-14 乾燥ノズルの昇温特性

5. 操作シーケンスの開発

プロセス条件の指示はタッチパネルのレシピ画面から入力して行う。

2流体ノズルの選択・動作、スピン回転数、旋回速度、気液の吐出量、セパレータ開閉、超音波 ON/OFF、 真空選択(高/低)等の指示はレシピにて行う。レシピ画面の一例を図 2-1-15 に示す。流量・圧力、回転 数、減圧チャンバ内の真空圧等のプロセス状態もタッチパネル上に表示するようにした。また各種のイン ターロックを取り入れて安全性を保っている。

13 171005		REJISUYT	o hakuri 🛛	2EK I							
	2797°1	ステラフマ	ステッフ*3	ステゥフ・4	ステッフ*5	ステッフ*6	ステップで	ステゥフ*8	77779	ステァフ*10	ステッフ*11
											<u> </u>
処理時間 sec	3.0	60.0	300.0	5.0	10.0	240.0	5.0	10.0	240.0	10.0	10.0
スピン回転数 RPM	5	5	200	200	200	200	200	200	400	200	0
エッチングノズルOH/OFF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
レジストノズル ON/OFF	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
純水ノス*ル ON/OFF	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
旋回速度 度/SEC	30.0	5.0	5.0	30.0	30.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N2吐出(行動作)ON/OFF	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
N2吐出(灵動作)ON/OFF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
液吐出(行動作)ON/OFF	1	1	1	0	2	2	0	0	0	0	0
液吐出(更動作)on/off	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
セパレータ 排水/日	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	2
超音波 ON/OFF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hot N2上限 C	0.0	0.0	0.0	20.0	60.0	0.0	60.0	60.0	100.0	90.0	20.0
ノズル位置 4/3/2/1/0	3	3	4	0	3	4	0	0	0	0	0
<u>真空選択 2/1/0</u>	0	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0
×ノズル位置 0:持種位は × 真空選択 0:大気圧1	世1:ワーク構 :低圧2:高 :	2:中間3: 圧	中心4:24	25 x x	渡吐出 O: セパレータ (停止1:吐出 0:開1:セパ	12:急速吐出	8 2:セパレー!	92 11 水3:7	町方耕水	〒1:ワーク :低圧2:高

図 2-1-15 レシピ画面の例

以上に述べた開発要素の検討課題等をクリアして完成した試作装置の全景を図 2-1-16 に示す。



図 2-1-16 開発した試作装置の外観

2-2 2流体噴射処理技術の開発(特開 2017-159195)

アスペクト比の高いパターン内部までレジスト剥離液を噴射するために、図 2-2-1 に示すようなノズ ルの出口で2流体を混合する方法を考案した。これを基に具体的に設計した構造を図 2-2-2 に示す。

ノズルチップとシャッタの穴寸法の組合せで噴射パターン等を簡単に自由に変更できるようにした。

エッチング液を使用するので接液部及びボディ等の材質はすべて PFA や PTFE 等のフッ素樹脂とした。レジスト剥離剤及びエッチング液は PTFE 製のプロセスポンプを使い、純水は工場ユーティリティからそれぞれボディに接続した。N2ガスは市販のガスボンベから供給した。



図 2-2-1 2流体ノズルの概要



図 2-2-2 2流体ノズルの構造

設計した2流体ノズルから、どれくらいの速度で気体(N2)が噴射するかを流体解析した。その一例を図 2-2-3 に示す。(a)の流速分布図からわかるように噴射速度は500m/sec(マッハ 1.5)程度が得られる。 (b)の流速ベクトル図と合わせて見ると、噴射後に急速に速度が減衰する結果となっている。

この解析結果が妥当かを検証するために横浜国立大学で同様の計算を実施してもらった。その内容及び 結果については 2-7 項で詳述する。



図 2-2-3 2流体ノズルの流体解析結果

N₂の流れにレジスト剥離剤等の液体が吸引されるように混合するのが理想的である。しかし、本構造 及び(c)の圧力分布図から推察されるようにノズル穴が流れのボトルネックになるので、両者の圧力関係 によっては各々の実際の流量は設定値からシフトする。

この特性を調査した結果を図 2-2-4 に示す。青枠内が2流体範囲である。本研究開発では、赤枠内の 気体: 10 L/min、液体: 0.2 L/min の流量を2流体ノズルの基本条件とした。



図 2-2-4 2流体ノズルの流量特性

図 2-2-5 に 2 流体ノズルの外観写真及び 2 流体をウェーハに噴射する様子を示す。

2流体ノズルはノズルアームの先端に固定し、このノズルアームの昇降・旋回動作をサーボモータ で行う。図2-2-6に示すように2流体用の2本のチューブを通したノズルアーム回転軸は、減圧チャン バに施工した穴を通って昇降・旋回するために気密性、摺動性及び耐食性が必要である。この部分には PTFE 製のOリングを使用した。



- 18 -

2-3 ケミカル処理によるレジスト剥離プロセスの確立

1. レジスト剥離条件の検討

減圧下のケミカル処理により、高アスペクト比(アスペクト比20:1)の微細パターン内のレジスト剥離が可能であることは既に示されているが、レジストの種類によってレジスト剥離液を選定し、処理条件 (処理時間、減圧条件、温度、流量、処理液及びN2ガスの噴射圧力、回転テーブル速度等)の最適化を 行い、剥離特性の高度化を図る。

実験に先立ち、レジスト剥離ノズル、エッチングノズル及び純水ノズルの流量等のプロセス基本条件を 設定した。その概要を図 2-3-1 に示す。



図 2-3-1 プロセスの基本条件

2. 実験内容及び評価結果

次の3つの処理フローをベースとしてレジスト剥離実験を実施した。

- A.「レジスト剥離液」2流体噴射→「純水」2流体噴射→ 真空差圧乾燥
- B.「レジスト剥離液」超音波(以降 US と略す)加振→「純水」2流体噴射→ 真空差圧乾燥
- C.「2流体噴射」と「US加振」の組合せ

実験に供するウェーハは産業技術総合研究所で製作した次の2種類とした。

(ア) 幅=1 μ m、深さ=20 μ m、長さ=1mm、L/S=1 μ m/3 μ mの深溝パターン付 ϕ 4inch Si-Wafer

(イ) 径=1 μ m、深さ=20 μ mの深穴付 ϕ 4inch Si-Wafer

L/SはLine and Spaceの略である。

実験後ウェーハのパターン内のレジスト残渣の評価には光学顕微鏡、SEM 及び AFM 等を使用した。

以下、各処理フローの内容及び結果について述べる。

A.「レジスト剥離液」2流体噴射→「純水」2流体噴射→ 真空差圧乾燥

【条件 A-1】

•パターン:深溝、保護レジスト:AZ5214E				
・剥離液2流体:アセトン、ウェーハ回転数:100rpm、ノズル旋回速度:30°/sec				
\downarrow	チャンバ圧力:O(大気圧)、処理時間:3分			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:100rpm、ノズル旋回速度:30°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:O(大気圧)、処理時間:3分			
•乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-30kPa、処理時間:3分			
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				
この実験の目的は2流体噴射において、「減圧無し」の場合のレベルをまず調査することである。				

図 2-3-2 に光学顕微鏡と AFM による観察結果を示す。表面に輪ジミ等が多数見られた。

また図 2-3-3 に示すようにレジスト残渣が溝の縁に大きく盛り上がっていることが AFM によって確認された。チャンバ内を減圧せずに 2 流体噴射処理するだけでは、レジストは全く除去できない。



光顕像

AFM

図 2-3-2 条件 A-1 の光学顕微鏡、AFM によるクロスチェックの一例





【条件 A-2】



光学顕微鏡の観察結果を図 2-3-4 に示す。SEM 評価に至る以前で、既にレジスト残渣が確認された。 ウェーハに形成したパターンの位置によるばらつきがあるが、未剥離部があることから剥離液がレジスト を溶解する反応が不十分なことが一因と推察される。2 流体噴射の物理的な除去力だけでなく化学的な除 去力にも頼る必要があると考えた。



図 2-3-4 条件 A-2 の光学顕微鏡写真

そこでレジストと剥離液の反応(溶解)を促進するために剥離液の洗い流し(浸漬)を処理の最初に実施する条件に変更した。処理フローは以下の通りである。

A'.「レジスト剥離液」洗流し→「レジスト剥離液+N₂」2流体噴射→「純水」2流体噴射
 → 真空差圧乾燥

【条件 A'-1】

・パターン:深溝、保護レジスト:AZ5214E

・<u>剥離液洗流し</u>:アセトン、ウェーハ回転数:5rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)
 ↓ チャンバ圧力:0(大気圧)、<u>処理時間:1分</u>
 ・剥離液2流体:アセトン、<u>ウェーハ回転数:200rpm</u>、ノズル旋回速度:5°/sec
 ↓ チャンバ圧力:-20kPa、<u>処理時間:5分</u>
 ・純水2流体: <u>ウェーハ回転数:200rpm</u>、ノズル旋回速度:5°/sec
 ↓ チャンバ圧力:-20kPa、<u>処理時間:4分</u>
 ・乾燥: ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-23kPa、処理時間:3分
 (その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)

この実験以降、剥離液による洗流し追加の他にウェーハ回転数も変更した。2流体ノズル噴射がウェー ハ上に描く軌跡はウェーハ回転数とノズル旋回速度によって変化する。ウェーハ回転数が大きいほどまた ノズル旋回速度が小さいほど軌跡曲線は密になり、ウェーハに 9 箇所形成されたパターンに噴射液が当 たる頻度が増える。ウェーハ回転数とノズル旋回速度を変えた時のノズルの軌跡を計算した例を図 2-3-5 に示す。左側のグラフが最初に行った実験【条件 A-1】の軌跡であり、レジストが落ちなかった原因 は2流体噴射がパターンに当たっていなかったことにもあると考えられる。



図 2-3-5 ウェーハ上のノズルの軌跡

図 2-3-6 に実験後の溝パターンの Top view を、図 2-3-7 に溝パターン部で劈開して溝の断面を SEM で観察した写真をそれぞれ示す。



図 2-3-6 条件 A'-1 の SEM 写真(Top view)



図 2-3-7 条件 A'-1の SEM 写真(Cross section)

表面に見える汚れは断面試料を観察する際に使用した副材の破片である。また最表面に見える層は深堀 エッチングのための保護膜(Cr)である。

溝の上部、中間及び底をそれぞれ観察した例を図 2-3-8 に示す。溝の側壁のスキャロップ(Scallops) 等のため残留パーティクルの判別が難しい箇所があるが、概ねレジスト残渣等は観察されず、レジストは きれいに除去されている。



図 2-3-8 条件 A'-1 の溝部の詳細(Cross section)

【条件 A'-2】

・パターン: 深穴、保護レジスト: AZ5214E
 ・剥離液洗流し: アセトン、ウェーハ回転数: 5rpm、ノズル旋回: なし(ウェーハ中央固定)

 チャンバ圧力: O(大気圧)、処理時間: 1 分
 ・剥離液2流体: アセトン、ウェーハ回転数: 200rpm、ノズル旋回速度: 5°/sec
 チャンバ圧力: -10kPa、処理時間: 5 分
 ・純水2流体: ウェーハ回転数: 200rpm、ノズル旋回速度: 5°/sec
 チャンバ圧力: -10kPa、処理時間: 4 分
 ・乾燥: ウェーハ回転数: 400rpm、チャンバ圧力: -14kPa、処理時間: 4 分
 ・乾燥: ウェーハ回転数: 400rpm、チャンバ圧力: -14kPa、処理時間: 4 分
 ・支索(ス)の中国の(10,000)

図 2-3-9(a)~(c)に劈開して穴の断面を観察した SEM 写真を示す。深穴パターンのウェーハの表面 及び穴の上部にレジスト残渣が確認された。これについては、前述の「2流体噴射」と「US 加振」の処 理フローC で対策を試みる。



図 2-3-9(a) 条件 A'-2 の穴部の SEM 写真(Cross section)







図 2-3-9(c) 条件 A'-2 の穴部の SEM 写真(Cross section)

B.「レジスト剥離液」US 加振→「純水」2流体噴射→ 真空差圧乾燥

【条件 B-1】

・パターン:深溝、保護レジスト:AZ5214E				
・剥離液洗流し:	・剥離液洗流し:アセトン、ウェーハ回転数:20rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力: O(大気圧)、処理時間: 4分(貯込み)			
• 剥離液 US:	アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力/処理時間:-44kPa/40sec ⇔ 0(大気圧)/10sec×6回			
	<u>直接照射(パターン面に向けて US 照射)、照射距離:50mm 及び 3mm</u>			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:100rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-20kPa、処理時間:3分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-23kPa、処理時間:3分			
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				
この実験の目的に	この実験の目的は「US 加振」の効果がどのくらいあるかをまず確認することである。			

図 2-3-10 に US 照射距離が 50mm、図 2-3-11 に 3mm の光学顕微鏡写真をそれぞれ示す。 また SEM 写真を図 2-3-12 に示す。

いずれの US 照射距離においてもトレンチ(Trench)パターンが破壊して脱落した様子が見られた。トレンチ端は破壊せずに残っていることから、共振を起こしてトレンチ同士が衝突して破壊に至ったと推察される。



図 2-3-10 条件 B-1 (US 照射距離 50mm)の光学顕微鏡写真





(a) US 照射距離 50mm

(b) US 照射距離 3mm

図 2-3-12 条件 B-1 の SEM 写真(Top view)

【条件 B-2】

・パターン:深溝、保護レジスト: AZ5214E

- ・剥離液洗流し:アセトン、ウェーハ回転数:20rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)
 ↓ チャンバ圧力:0(大気圧)、処理時間:4分(貯込み)
- ・剥離液 US: アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)
 ↓ チャンバ圧力/処理時間:-44kPa/40sec ⇔ 0(大気圧)/10sec×6回
 間接照射(パターン面の裏面に向けて US 照射)、照射距離:50mm
- ・純水2流体: <u>ウェーハ回転数:200rpm</u>、ノズル旋回速度:5°/sec
- ↓ チャンバ圧力:-13kPa、<u>処理時間:4分</u>
- ・乾燥:
 ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-23kPa、処理時間:3分
 (その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)

この実験の目的はウェーハのセット方向を変えて、『US 加振』をパターン面の裏面から行う場合にトレンチの破壊・損傷及びレジスト残渣がどうなるか確認することである。

図 2-3-13、図 2-3-14 に処理後の溝パターンの SEM 写真を示す。トレンチの損傷はなく、深溝内 にレジスト残渣等は確認されない結果が得られた。



図 2-3-13 条件 B-2の SEM 写真(Top view)



図 2-3-14 条件 B-2の SEM 写真(Cross section)

【条件 B-3】

・ <u>パターン:深穴</u> 、保護レジスト:AZ5214E				
・剥離液洗流し	:アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力:〇(大気圧)、処理時間:6分(貯込み)			
• 剥離液 US:	アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧カ/処理時間:-37kPa/40sec ↔ 0(大気圧)/10sec×6回			
	間接照射(パターン面の裏面に向けて US 照射)、照射距離:50mm			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-13kPa、処理時間:4分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-14kPa、処理時間:4分			
(その他の条	件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる			

この実験では深穴パターンのウェーハを使った。

図 2-3-15 に劈開して穴の断面を SEM 観察した写真を示す。表面にレジスト残渣が多く見られ、レジストの溶解が不十分と思われる。



図 2-3-15 条件 B-3 の穴部の SEM 写真(Cross section)

【条件 B-4】

Г

・ <u>パターン:深</u> が	<u>へ、保護レジスト:gL2000</u>			
・剥離液洗流し	: <u>NMP</u> 、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
Ļ	チャンバ圧力:〇(大気圧)、処理時間:6分(貯込み)			
• 剥離液 US:	NMP、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力/処理時間:-39kPa/40sec ↔ 0(大気圧)/10sec×6回			
	直接照射(パターン面に向けて US 照射)、照射距離:50mm			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
Ļ	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:4分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-22kPa、処理時間:4分			
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				

この実験では深穴パターンのウェーハの保護レジストに gL2000 を使い、パターン面に向けて直接 US 照射を行った。深溝と違って深穴の場合であれば直接US 照射してもパターン破壊は起こらないと考 えた。

図 2-3-16 に劈開して穴の上部を SEM 観察した写真を示す。表面にレジスト残渣が見られたが、予 想通り深穴パターンのウェーハでは損傷、破壊はなかった。パターンによっては直接 US 照射を行うこと ができると考える。



図 2-3-16 条件 B-4 の穴部の SEM 写真(Cross section)

C.「2流体噴射」と「US加振」の組合せ

【条件 C-1】

•パターン:深溝、保護レジスト:AZ5214E				
・剥離液洗流し	・剥離液洗流し:アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力:O(大気圧)、処理時間:2分			
• 剥離液2流体:	:アセトン、ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:3分			
• 剥離液 US:	アセトン、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力/処理時間:-37kPa/40sec ↔ 0(大気圧)/10sec×6回			
	間接照射(パターン面の裏面に向けて US 照射)、照射距離:50mm			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-10kPa、 <u>処理時間:4分</u>			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-14kPa、処理時間:4 分			
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				

この実験の目的は2流体ノズル噴射とUS加振の両方の処理を行うことによって、さらに清浄度が向上 するかを確認することである。

図 2-3-17(a)~(c)に溝の断面を SEM で観察した写真を示す。

同図(a)及び(c)では溝の底にパーティクル等は観察されないが、溝の上部にレジスト残渣が散見された。 溶解したレジストがウェーハ外に排出されずに溝の中に移動して再付着を起こしたように見える。

同図(b)は比較的きれいで、レジストやパーティクル残渣は確認されなかった。

以上の観察結果から、2 流体ノズル噴射と US 加振の両方の処理を行うことの効果の判断はもう少し DATA を採らないと下せないが、目標のパーティクル数を達成する見通しは検証できた。



図 2-3-17(a) 条件 C-1 の溝部の SEM 写真(Cross section)



図 2-3-17(b) 条件 C-1 の溝部の SEM 写真(Cross section)



図 2-3-17(c) 条件 C-1 の溝部の SEM 写真(Cross section)

【条件 C-2】

・パターン:深溝、保護レジスト: AZ5214E
 ・剥離液洗流し:アセトン、ウェーハ回転数: 10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)

 チャンバ圧力: O(大気圧)、処理時間: 2分

 ・剥離液2流体:アセトン、ウェーハ回転数: 200rpm、ノズル旋回速度: 5°/sec

 チャンバ圧力: -10kPa、処理時間: 3分
 ・剥離液US: アセトン、ウェーハ回転数: 10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)

 チャンバ圧力/処理時間: -37kPa/40sec ⇔ O(大気圧)/10sec×6回
 間接照射(パターン面の裏面に向けてUS 照射)、照射距離: 50mm
 ・乾燥: ウェーハ回転数: 400rpm、チャンバ圧力: -14kPa、処理時間: 3分
 (その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)

この実験は「純水2流体噴射」を除いても清浄度は保てるかを検証するために行った。剥離液にアセトンを使用する場合に可能な限定実験であり、NMP等の乾きにくい溶剤ではできない。

図 2-3-18(a)~(c)に溝の断面の SEM 観察写真を示す。同図(c)が顕著であるが、【条件 C-1】と同様に溝の上部にレジスト残渣が観察された。







図 2-3-18(c) 条件 C-2 の溝部の SEM 写真(Cross section)

【条件 C-3】

・ <u>パターン:深穴、保護レジスト:gL2000</u>					
• 剥離液洗流し: <u>NMP</u> 、ウェーハ回転数: 10rpm、ノズル旋回: なし(ウェーハ中央固定)					
\downarrow	チャンバ圧力: O(大気圧)、処理時間: 1分				
• 剥離液2流体	: <u>NMP</u> 、ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec				
\downarrow	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:4分				
• 剥離液 US:	NMP、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)				
\downarrow	チャンバ圧カ/処理時間:-39kPa/40sec ↔ 0(大気圧)/10sec×6回				
	間接照射(パターン面の裏面に向けて US 照射)、照射距離:50mm				
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec				
\downarrow	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:4分				
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-22kPa、処理時間:4分				
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)					

この実験の目的は2流体ノズル噴射と US 加振の両方の処理を深穴付ウェーハに行うことによって、 清浄度が向上するかを追試することである

図 2-3-19 に穴の断面の SEM 観察写真を示す。 劈開がうまくいかず穴全体が撮影できていないが、 表面及び穴の上部にレジスト残渣が確認された。 特に穴の上部は、 穴の内側の凹凸にへばり付くようにレ ジストが付着しているように見える。



図 2-3-19 条件 C-3 の穴部の SEM 写真(Cross section)

他の穴について上部だけを中心に撮影した SEM 写真を図 2-3-20 に示す。約1µmの深さまでレジ ストが付着して残っている。

このようなレジスト付着残渣が除去されるかどうか、「US 加振→2 流体噴射×2 サイクル」の比較的 強めの処理条件を検討し、次の実験(C-4)を計画した。





図 2-3-20 条件 C-3 の穴上部の SEM 写真(Cross section)

【条件 C-4】

・パターン:深穴、保護レジスト:gL2000				
・剥離液洗流し:NMP、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)				
\downarrow	チャンバ圧力: O(大気圧)、処理時間: 6分(貯込み)			
• 剥離液 US:	NMP、ウェーハ回転数:10rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
\downarrow	チャンバ圧力/処理時間:-37kPa/40sec ⇔ 0(大気圧)/10sec×6回			
	間接照射(パターン面の裏面に向けて US 照射)、照射距離:50mm			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-13kPa、処理時間:4分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-14kPa、処理時間:4分			
(その他の条	件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)			
\downarrow				
・剥離液洗流し	:NMP、ウェーハ回転数:5rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
Ļ	チャンバ圧力:O(大気圧)、処理時間:1分			
• 剥離液2流体	:NMP、ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
Ļ	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:5分			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
Ļ	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:4分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-22kPa、処理時間:4分			
(その他の条	件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)			
↓				
・剥離液洗流し	:NMP、ウェーハ回転数:5rpm、ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)			
Ļ	チャンバ圧力:O(大気圧)、処理時間:1分			
• 剥離液2流体	:NMP、ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
Ļ	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:5分			
•純水2流体:	ウェーハ回転数:200rpm、ノズル旋回速度:5°/sec			
\downarrow	チャンバ圧力:-10kPa、処理時間:4分			
• 乾燥:	ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-22kPa、処理時間:4分			
(その他の条	件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)			

この実験の目的は処理回数(時間)を多くすれば清浄度が向上するかを検証することである。

図 2-3-21 に穴の断面の SEM 観察写真を示す。 【条件 C-3】 で多く観察された穴の上部のレジスト がきれいに落ちていることが確認された。

観察ポイントを増やして確認した写真を図 2-3-22 に示す。穴の開口部付近に付着したようなレジストは除去されていて、処理回数あるいは時間を長くすればレジスト残渣が無くなる傾向が見て取れる。



図 2-3-21 条件 C-4 の穴部の SEM 写真(Cross section)



図 2-3-22 条件 C-4 の穴上部の SEM 写真(Cross section)

2-4 バックエッチングプロセスの確立

本研究開発のバックエッチングの目的は、1-3 成果概要の4項で述べたように、「Siの酸化膜除去」 及びその際の「ウェーハ板厚に対する平坦度変化が0.3%以内」の2点である。

1. 評価方法

酸化膜が除去されたかどうかは、最も簡便な接触角測定によって評価した。純水の接触角は Si 表面の 酸化膜や汚染評価等の実用的な指標としてよく用いられているからである。

エッチング量はウェーハの厚さ変化から計算し、ウェーハの厚さの測定は非接触光学センサである CHRocodile センサ(Precitec 社製)を用いて行った。

ウェーハの反りについてはウェーハの面圧分布から最大たわみを材料力学の計算式を使って算出¹¹し、 これを反り量(平坦度)とした。面圧分布はタクタイルセンサシステム(ニッタ社製)を使って測定した。図 2-4-1 に測定の概要を示す。ウェーハのエッジがセンサシートに偏当り等しないように上下をクッショ ン材で挟み、その上から荷重(プレート)を置いて測定した。



図 2-4-1 タクタイルセンサシステムによるウェーハの面圧測定の概要

上記の方法でウェーハの平坦度変化を評価できるかを検証するために、まずエッチング量と面圧の関係 を調査した。傾向を大きく捉えるためにエッチング液にはエッチングレートの大きい HF: HNO₃: CH₃COOH = 5:9:1の重量比の混酸を使用し、Si 自然酸化膜だけでなく Si までエッチングした。

【条件 D-O】

•パターン:なし、保護レジスト:OMR100(東京応化工業社製)をエッチング逆面に塗布				
・エッチング液2流体: <u>HF:HNO₃:CH₃COOH=5:9:1(重量比)</u> 、ウェーハ回転数:100rpm、				
↓ ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)、チャンバ圧力:-25kPa、処理時間:1分				
 ・純水2流体:ウェーハ回転数:100rpm、ノズル旋回速度:10°→5°/sec(半々) 				
↓ チャンバ圧力:-25kPa、処理時間:2分				
・乾燥: ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-25kPa、処理時間:3分				
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				
	_			

エッチングは以下に示す2つの反応式によって記述される。

図 2-4-2 にエッチング量と面圧差の関係を示す。エッチング量が大きくなると面圧差が大きくなる結果となった。

図 2-4-3 は縦軸にとった面圧差を説明するための面圧分布の測定例である。エッチング面を下にして 測定した面圧分布は、僅かであるがウェーハの中央の圧力が高くなった。この理由はウェーハの片面(鏡 面加工面)の圧縮残留応力層がエッチングによって除去され、表裏の応力バランスが崩れたことによると 推察される。

図 2-4-1 に示したようにウェーハに荷重をかけて反りを矯正した状態で面圧を測定しているので、この矯正分をキャンセルする必要がある。そこでウェーハのセット方向を変えてそれぞれの面圧を測定し、 その差分が反りだけに起因する圧力になると考え、これを本項では「面圧差」と称した。



図 2-4-2 エッチング量と圧力分布の関係

図 2-4-3 ウェーハセット方向による面圧差

ウェーハの最大たわみをω。とすると面圧 p との関係は 右枠内の式で表される。この面圧に上述の面圧差の値を使 って最大たわみを算出した。

図 2-4-4 にエッチング量と最大たわみの関係(検量線) を示す。エッチング量が増えるとウェーハのたわみが大き くなる傾向が得られ、本評価方法でウェーハの反りが評価 できることを検証した。

ちなみに【条件 D-O】で用いた混酸では、例えばエッチ ング量=44 µmのウェーハのようにステイン(Stain)が表面 に見られた。エッチング量に依存するが、分布(Etching Uniformity)もよくない。



エッチング液組成、ノズル動作、ウェーハ回転数及び液のみ吐出等の条件を振って実験したが、ウェー ハ中央のエッチングレートが低い分布傾向を改善する方向性は見出せなかった。

本研究開発の動作原理の一つである「減圧下、2流体噴射」だけではエッチング均一性の問題は簡単に 解決できないと考える。



図 2-4-4 エッチング量と最大たわみの関係及びエッチング面の写真、分布例

2. 実験内容及び評価結果

次の処理フローをベースとして実験を実施した。

D.「エッチング液」2流体噴射→「純水」2流体噴射→ 真空差圧乾燥

実験に使用するウェーハは、

(ウ) t525±25μm、両面ミラーのφ4inch Si-Wafer

とした。

【条件 D-1】

• パターン: なし、保護レジスト: OMR100 をエッチング逆面に塗布				
• エッチング液2流体: <u>5wt%HF</u> 、ウェーハ回転数:100rpm、				
↓ ノズル旋回:なし(ウェーハ中央固定)、チャンバ圧力:-28kPa、処理時間:1分				
・純水2流体:ウェーハ回転数:100rpm、ノズル旋回速度:10°→5°/sec(半々)				
↓ チャンバ圧力:-10kPa、 <u>処理時間:1分</u>				
・乾燥: ウェーハ回転数:400rpm、チャンバ圧力:-30kPa、処理時間:3分				
(その他の条件については図 2-3-1 に示した基本条件に準ずる)				
酸化膜の除去によく使われるフッ酸(HF)とSiO₂の反応式は以下のようになる。				
$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$				

図 2-4-5 にバックエッチング前後のウェーハの板厚測定例及びエッチング面の外観写真を示す。 約 0.2 μ mのエッチング量となり、【条件 D-O】で用いた組成の混酸で見られたステイン等は認められ なかった。



図 2-4-5 バックエッチング前後の板厚及びエッチング面の外観

図 2-4-6 にバックエッチング前後の接触角の観察例を示す。SiO₂の終末端の水酸基(-OH 基)がエッチングによって除去されて疎水性をもつ水素終端(Si-H)が現れた²と推察され、酸化膜は除去されたと考える。



図 2-4-6 エッチング前後の接触角変化

図 2-4-7 にバックエッチング前後の面圧測定例を示す。このウェーハの場合、最初エッチング予定面 を凸に反っていたのがプロセス処理後にエッチング面を凹にして変形したため、結果的に反り量が小さく なった例と考えられる。

面圧差から反り量は、エッチング前 18.4 μmがエッチング後に 17.5 μmに変化したと計算される。 この場合、評価指標である反り量変化/板厚の値は -0.17 %となる。



図 2-4-7 バックエッチング前後の面圧分布

【条件 D-1】で5回実験を行った結果を表 2-4-1 にまとめた。 板厚に対する反り量変化の値は±0.2%以内で推移していて、目標達成が見込まれる。

Test No.	Thickness t (um) エッチング量 測定時の			面圧AVG(kPa)				反り量 ω ₀ (um)		<i>_</i> ω ₀	⊿ω₀⁄t			
	エッチング前	エッチング後	(um)	エッチング面	エッチング前	エッチング前面圧差	エッチング後	エッチング後面圧差	エッチング前	エッチング後	(um)	(%)		
1	1 526.8 526.7	0.11	上	2.358	0.072	2.382	0.067	11 40	10.50	-0.02	_0.19			
1		JZ0.7	0.11	下	2.431	0.073	2.449	0.007	11.43	10.00	-0.93	0.10		
2	527 1	E07.1 E06.0	526.0 0.24	上	2.662	0 167	2.584	0 1 7 1	26.10	26.76	0.66	0.12		
2	2 527.1 520.9	0.24	下	2.829	0.107	2.755	0.171	20.10	20.70	0.00	0.15			
2	520.2	500.0	0 17	上	2.610	-0.150	2.571	-0.154	-24 70	-23.95	0.75	0.14		
3	5 526.2 528.0	JZ0.0	0.17	下	2.451	0.159	2.417		24.70			0.14		
4	4 526.3 526.1	E06 0	E06 1	0.00	0.00	上	2.532	0.000	2.370	0.095	1410	12.26	_0.77	-0.15
4		520.1	0.22	下	2.622	0.090	2.455	0.065	14.15	13.30	-0.77	-0.15		
5	E E04.6 E04.4	1 0.00	上	2.553	0 100	2.516	0 1 0 0	17.00	16 10	1.00	0.21			
5 524.6	524.4	JZ4.4	0.22	下	2.444	-0.109	2.414	-0.102	-17.20	-10.19	1.09	0.21		

表 2-4-1 バックエッチング実験結果一覧

2-5 半導体製造工程における開発装置の総合的な機能・動作・性能の評価

同一装置で「レジスト剥離〜バックエッチング〜洗浄・乾燥」の一連のプロセス処理動作が可能となり、 アスペクト比20:1の深溝パターンについては残留パーティクル数の目標は達成された。

当初計画にはなかったが、アスペクト比20の深穴パターン付ウェーハを産業技術総合研究所に作製、 提供してもらい、装置性能の把握・見極めを目的としてレジスト剥離実験を追加した。2-3項で示した 通り、穴の入口(開口)付近にレジスト残渣が確認された。最終的な検証までには至っていないが難易度は 高いと考える。「レジスト剥離〜バックエッチング〜洗浄・乾燥」の装置台数については4台から1台に 削減可能である。

平成 28 年 4 月 6 日の Photomask Japan 2016 で本研究開発のプレゼンテーションを行い、平成 29 年 6 月 7~8 日の 2017 JPCA Show に出展し研究開発内容を PR した。

2-6 アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製

1. 微細深溝パターンを形成した小口径半導体ウェーハ

文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」における共同利用設備を利活用し、当該共同利 用設備の保有する基盤技術を導入後、必要とされる微細深溝パターン加工ノウハウを主体的に構築 し、図2-6-1に示す基本作製プロセスを確立した。当該作製プロセスを用いて4インチシリコン 半導体ウェーハ上に「微細深溝パターン」および「微細深穴パターン」を実加工した。図2-6-2 に、作製された「微細深溝パターン付ウェーハ」および「微細深穴パターン付ウェーハ」の電子顕微 鏡像を示す。目標を満たす加工寸法の「微細深溝」および「微細深穴」が作製できていることが確認 できる。

図 2-6-3 に、レジストを塗布した「微細深穴パターン付ウェーハ」の断面電子顕微鏡像を示す。 溶媒希釈を行い粘度を低下させた電子線レジストを塗布後、ウェーハを減圧下に静置することによ り、微細深穴の底部まで、レジストが充填できていることが確認できる。





図2-6-3 レジストを充填した微細深穴の断面電子顕微鏡像

 テストプロセス処理が施された「微細深溝パターンを形成したウェーハ」のパーティクル残渣評価 残留パーティクル数を検証実施プロセスの各過程において管理する際、パーティクル汚染が最も懸念 されるのは、研究等実施機関間での「試験ウェーハ」輸送過程と考えられる。そのため、評価に先立 ち、「パーティクル追加汚染のないウェーハ輸送方法」を検討した。「微細深溝パターンを形成したウェ ーハ」を入れたウェーハトレーを封入するシーラー袋を多重化し、トレーを封入するシーラー袋は常 圧、外側のシーラー袋は減圧封止することにより、概ね良好な結果が得られることが確認できた。

パーティクル残渣評価は、ウェーハ上面においては、光学顕微鏡、原子間力顕微鏡、走査電子顕微鏡の組み合わせ利用により実施した。図2-6-4に残渣評価の概念図を示す。深溝および深穴中のパー ティクル残渣評価は、劈開により断面試料を作成し、走査電子顕微鏡観察によって実施した。断面試料 作成時にもパーティクル汚染がないようにすることが必要であるため、パーティクル追加汚染のない断 面試料作製方法および断面試料片保管のノウハウ構築を実施している。図2-6-5に、適切な処理条件 により処理された微細深穴の断面走査電子顕微鏡像を示す。残留パーティクルが確認されず、開発装置 が目標品質を達成していることが確認できる。



図2-6-4 光学顕微鏡、原子間力顕微鏡、 走査電子顕微鏡を組み合わせた残留パーティクル 評価の概念図



図2-6-5 適切な処理条件により処理された微細深穴の断面走査電子顕微鏡像

- 2-7 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明
 - 1. 窒素ガス噴流によるウェーハ上の圧力分布測定

窒素噴流が残留物の除去に及ぼす影響を調べるために、ウェーハ上に直径 1mm の圧力測定孔を多数設置し、ウェーハ上の圧力分布を測定した。図 2-7-1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は、 窒素タンク、真空ポンプ、減圧容器、窒素噴流を流出させるノズル、ノズルカバー、ウェーハを模擬し たアクリル円板からなる。圧力測定孔は、図 2-7-2 に示すように、ノズルを中心とした放射状の A、 B、 C、 D 上に設置した。



図 2-7-1 実験装置概略

図 2-7-2 ウェーハー部圧力測定孔分布

圧力測定には、株式会社 Fujikura 製の絶対圧力計 FPM-15PGR を使用した。また、容器内の圧力 は、ウェーハ上の r = 45mm の位置の測定値とした。実験は、窒素噴流の流量 20 // min として、 容器内のゲージ圧力 Po = - 0.17 X 10⁵ gage Pa、 - 0.5 X 10⁵ gage Pa、 の2つの圧力条件 について、ノズルキャップの下部とウェーハの距離を、h=1mm、 2mm、 3mm、 4mm、5mm と 変化させて実施した。

図 2-7-3、図 2-7-4 に、Po=-0.17 X 10⁵ gage Pa、 - 0.5 X 10⁵ gage Pa に対す る、容器内圧力とウェーハ上の圧力差 Δp=p-po を示す。図中、r=15mm の位置が、ノズルキャッ プの端にあたる。



図より、いずれのケースも、|r|=5mm ~ 14mm の領域で、容器内圧力よりも僅かではある が、低圧状態になっており、この領域で微細溝の残留物が除去される可能性のあることが予想される。

2. 圧縮性 Navier-Stokes 方程式を基礎とした装置内の気流解析

減圧容器内に流れの様子と、微細溝の流れの解析を行うための境界条件を設定するために、圧縮性の Navier-Stokes 方程式を用いて数値解析を行った。

解析対象は、図2-7-5 に示すように、窒素噴流の流入部、拡大ノズル、ノズルキャップ、 ウェーハを設置した減圧容器内とする。流れ場を軸対象二次元と仮定し、計算領域を図2-7-6 に示すように取る。計算領域を、×方向、r方向にそれぞれ425、285の不等間隔格子に分割した。 ただしノズル、ノズルカバー、ウェーハ部の壁面近傍では、境界と近傍格子の距離が10μmになるように設定した。基礎方程式は、有限体積的に離散化し、対流項は、Harten Lax Van Leer Contuct(HLLC)により評価した。また対流項の高次精度化は、Monotone Upstream-centered Scheme for Conservation Laws (MUSCL)法を適用した。粘性項は2次精度の中心差分的に評価 し、時間発展は2次精度のRunge-Kutta 法を適用した。その他の計算条件を表 2-7-1 に示す.



図2-7-5 計算対象流れ場



表 2-7-1 計算条件

流入部直径	d = 4mm		
ウェーハとノズルカバー下面との距離	h=1、2、3、4、5mm		
流入速度	$U_{\rm m}$ = 26.53 m / s (20 // min)		
流入部圧力	pin=0、07、0.1、0.17 MPa		
流入部温度	7in = 20 ℃		
初期容器内圧力	$p_0 = 0.05 \text{ Mpa}$		
初期容器内温度	7in = 20 ℃		
壁面境界条件	壁面温度 T _w = 20℃のすべり無し条件		
r = 37.5mm の境界条件	T=20℃、p=0.05Maの自由流出		

図2-7-7、図2-7-8 に、それぞれ流入部圧力が 0.17 MPa における、流れ場の圧力分布図と速度 ベクトル図を示す。





図2-7-7 pin = 0.17 MPa における圧力分布図



図2-7-8 pin = 0.17 MPa における速度分布図

圧力分布図と、速度分布図より、ノズルの拡大部で流れの剥離が生じていることがわかり、適切な膨 張噴流となっていないことが予想される。ノズルの拡大部における流れの剥離現象は、他の圧力条件で も見られた。ウェーハ上の圧力分布については、図 2-7-9 に示すように、実験結果と大きく異なって おり、ノズルキャップ内で、実験で得られたような、容器内圧力よりも低くなる領域は全ての計算条件 で見られなかった。流入ガスの圧力と容器内の圧力の差が小さいと、実験結果と計算結果は近づく傾向 にあり、容器内が非圧縮流れに近い状態になっていることなどが予想され、非圧縮流れとしての解析も 必要であることが考えられる。



ただし、壁面圧力を p*=(p - pmin)/(pmax - pmin)と正規化し、0.5*(pmax - pmin)となる r 方向の幅 b(半値幅)で r 方向を r*=r/b と無次元化すると、図2-7-10 に示すように全てのケースで、 相似則が成り立ち、負圧になる部分以外では、全てのケースで実験と計算が良く一致することがわかる。 なお、ウェーハ上の 10μm の位置における流速は、全ての条件で音速を超えることはなかった。



図2-7-10 正規化した壁面圧力の実験結果と計算結果の比較

3. Boltzmann 方程式を基礎とした DSMC 法による微細溝内の気流解析

容器内の減圧状態($p_0 \simeq 0.5 \times 10^5 Pa$)において、深溝幅($1 \mu m$)を代表長さに選ぶと、流れ場の希薄度を表すクヌッセン数は、kn $\simeq 0.1$ のオーダーとなり、気流の解析は Boltzmann 方程式を

基礎とした技法を用いる必要がある。本研究では、Direct Simulation Monte Carlo 法を用いて、以下の2つの解析を実施した。

(1)深溝上部に気流がある場合の深溝内部の気流解析

減圧容器内に深溝が設置されたウェーハ上の流れ場を、図2-7-11 図の様に、幅1µm、 深さ20µmの溝が間隔2µmで無限に並んでいる2次元の流れ場と仮定する。計算領域を、 図2-7-12 図の様に取り、ウェーハ上10µmの位置に、平衡状態の一様な流れがあるとする。流 速は、Navier-Stokes 方程式の解析結果から、音速を超えていないことを考慮して、マッハ数 Ma=1.0、0.1 の二つの条件について解析した。計算に用いた格子サイズ、計算条件、境界条件、分 子間衝突モデル、計算に用いた模擬分子数を表 2-7-2 に示す。



図2-7-11 計算モデル図



図2-7-12 計算領域図

$\pm \circ$	7 0	
モンー	1-1	=+目-仝仏
18 2	I _	

計算格子サイズ	$\Delta x = \Delta y = 0.1 \ \mu$
壁面境界	T _w =20℃の完全拡散反射
気流部の境界条件	周期境界
ウェーハ上部 10μm の位置の境界条件	Po=0.5 X 10-5 Pa、 To=20°C、
ウェーハ上部 10μm の位置の速度(マッハ数)	Ma =0.1、 1.0
分子間衝突モデル	VSS モデル、SICS モデル
計算に用いた模擬分子数	4,000,000

図 2-7-13 および図 2-7-14 に、Ma=0.1 、 1.0 の速度ベクトル図ならびに、流線図を示す. 図 2-7-13 に示すように、Ma=0.1 では、深溝内に弱い渦流れが形成されていることが確認できるが、 溝底部にまで到達するような流れは形成されていないことがわかる。また、上部の流れのマッハ数を Ma=1.0 にすると、溝の上部 1 µm付近に Ma=0.1 の場合よりもはっきりとした渦が形成されていることが確認できる。しかし、Ma=0.1 の場合と同様に、溝の底部に気流が生じることは確認できなかった。以上より、一様流れにより深溝内に発生させた渦流れには、深溝底部に存在する残留物を除去する能力は低いことが予想され、別の機構を考える必要のあることが確認された。



図 2-7-13 流れ場の速度分布と流線(Ma=0.1)



(2) 容器内が減圧されることによる深溝内部の気流の非定常解析

2-7、3.(1)の結果から、容器内の圧力が常圧から減圧された際に、深溝に生じる流れの非定 常解析を行い、残留物の除去の可能性について検討した。計算手法、計算領域、計算条件等は、2-7、 3.(1)と同様であるが、深溝上部の境界を5μmとし、上部境界の速度を0としている。また、 圧力については、実験による圧力の最大値と最小値の比、実験における、容器内と噴流入り口部の圧 力比等を参考にして、p=7.2X10⁻⁴ Pa と設定した。

図 2-7-15(a)、(b)~図 2-7-17(a)、(b)に、t=0µs、0.11232 µs、0.22560 µs における、 速度ベクトル分布と圧力分布図を示す。図に示すように、時間の発展と共に圧力が低下し、微細溝内 の気流が上昇していくことが確認できる。これより、容器内を減圧することで、微細溝に速度が誘発 され、残留物を除去される可能性があると考えられる。







図 2-7-16 深溝内速度ベクトル分布と圧力分布(t=0.11232 μs)



(a)速度ベクトル分布
 (b) 圧力分布
 (c) 2-7-17 深溝内速度ベクトル分布と圧力分布(t=0.22560 μs)

まとめ

以上の事から、微細溝内の残留物を除去するには、容器内圧力を下げ、微細溝に気流を発生させることが 有効と考えられる。一方、噴流はウェーハ上で、周りの雰囲気よりも圧力が下がる部分があり、残留物の 除去に多少効果があると考えられるが、容器内圧力を低下させて微細溝から流出した残留物を容器から排 出する効果の方が大きいと考えられる。 第3章 複数年の研究開発成果

3-1 平成 27 年度の研究開発成果

1. 真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発

減圧チャンバ、2流体ノズルの昇降・旋回、スピンドル、乾燥ノズル・ヒータ、真空排気・薬液供給配 管及び電装・制御等のユニット別に仕様検討・設計を行った。

組立途中で発覚した不具合等について対策しながら装置を製作した。

2.2流体噴射ノズルの開発

出願内容及び数値解析を用いて2流体噴射ノズル形状の検討を行った。数値解析には富士通九州システムズ社製の解析ソフト Autodesk CFD を使用した。この結果、噴射速度 = 500m/sec(≒マッハ 1.5) が得られたので構造・寸法を決定し2流体噴射ノズルの 1st モデルを製作した。

3. 超音波振動子付きロータの開発

超音波振動子付ロータの設計を進め、平成28年2月29日に開発メーカー(本多電子株式会社)で行った立合検査において液浸=45mmで周波数=45kHz及び100kHzのチューニングを完了し、スリップリング介しての回転時も超音波発振が安定していて問題ないことを確認した。

4. アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製

微細深溝形成ノウハウを構築し、設計寸法が、幅1µm、アスペクト比20:1の微細深溝のアレイパ ターンをシリコン半導体小口径ウェーハ上に形成することが可能となり、補助事業において開発される 「微細パターンの基板に対応した真空差圧式レジスト剥離、エッチング装置」の性能評価に必須である高 精密加工プロセス評価用テストパターンを作製した。

作製されたテストパターンウェーハにおける加工パターンの形状や残留パーティクルの有無等の評価 を、走査電子顕微鏡および3次元測定レーザー顕微鏡を用いて実施するとともに、高精密加工プロセス 評価用テストパターンとしての有効性の確認を行い、補助事業において開発される装置の性能評価手法を 準備した。

5. 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明

開発試作装置を模した「評価機」を製作し、圧力センサなどの各種センサを搭載した。センサ測定値を 基に、窒素、洗浄液の空気力学的流動解析により、レジストの剥離状態をシミュレーションし、結果を開 発試作装置にフィードバックした。 3-2 平成 28 年度の研究開発成果

1. 真空差圧を利用したレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理装置の開発

昨年度から継続して製作した開発試作装置の立上げを行い、レジスト剥離・エッチング・洗浄・乾燥処 理の自動運転動作が可能になった。

さらにノズルアーム駆動機構、減圧チャンバ形状、乾燥ノズル形状及び配管フロー等の改造・改良を行 うことによってプロセス条件の精度、自由度を高め、実験・評価の準備を整えた。

また本開発装置に模した評価機の改造等も完了し、窒素噴流によるウェーハ上の圧力が測定できるよう にした。

2.2流体噴射ノズルの開発

2流体噴射ノズル圧力・流量設定等及びレシピ修正・ソフト修正・動作確認のルーチンを回し、パターン付ウェーハの実験準備を完了した。

図 2-2-4 の青枠内に示した 2 流体範囲において深溝パターンの損傷発生はないことを確認した。

3. 超音波振動子付きロータの開発

超音波加振の条件設定及びレシピ修正・ソフト修正・動作確認のルーチンを回し、パターン付ウェーハの実験準備を完了した。

ウェーハを超音波加振する時、図 3-2-1 に示すように2種類のセット方向がある。

深溝パターンの場合、(a)に示すようにパターン面を上にしてセットして超音波の最大パワー(300W) をかけても破壊や損傷は発生しなかった。しかし(b)のようにパターン面を下にしてセットすると 2-3 項 の【条件 B-1】で示したようなトレンチの破壊・損傷が発生するため条件としては NG であった。

ー方深穴パターンの場合、(b)のようにパターン面を下にしてセットして超音波の最大パワーをかけて も破壊や損傷の発生は確認されなかった。



4. アスペクト比の大きい微細深溝を有する半導体ウェーハの作製

本研究開発の評価に不可欠である「微細パターン付 4 インチ基板」と「パーティクル追加汚染のない ウェーハ輸送方法」が準備され、昨年度の補助事業により構築された微細深溝パターン基板を用いた試作 装置の性能評価手法と併せて用いることにより開発が促進される。

また微細パターン付基板を用いた高精密加工プロセス評価手法は汎用性があることより、補助事業体制 内に留まることなく、今後の小口径ウェーハ対応の高精密加工半導体デバイス製造プロセス・半導体デバ イス製造装置の開発支援に資することが可能となった。

5. 微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明

微細溝中の窒素ガス誘起渦流による残留パーティクル除去機構の解明と最適除去条件の探索を目的として、窒素噴流によるシリコンウェーハ上に形成される圧力分布を測定した。窒素噴流により形成される 平板上の圧力には、装置内の圧力(背圧)よりも低くなる部分のあることが確認された。

残留パーティクルの除去機構との関連を明らかにすることにより本事業で提案する装置の有効性を示 すことができた。 第4章 研究開発後の課題・事業展開

4-1 研究開発後の課題

1. 同一装置でレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理をする装置

深溝パターンのレジスト剥離に関しては実験・評価及び気流の数値解析によって溝の中のパーティクル が溝の外へ排出される気流発生メカニズムの両方によって検証できた。

深穴については本研究開発では追加検討の事項であり、数値解析等を実施していないため除去の可能性の有無の検討含め課題が残っている。各顧客毎のパターンに応じ、本研究開発の検討結果を参考にして進めていく。

バックエッチングに関しては、Si酸化膜の除去は問題なくできることを確認できた。

しかし、高いエッチングレートと良好なエッチング均一性が求められる基板を薄くするバックエッチン グへの適用には大きな課題がある。本論でも述べたが「減圧下、2流体噴射」だけではエッチング均一性 の問題は簡単に解決できないからである。エッチング液の最適化及びエッチングノズル噴射液の当て方、 具体的にはウェーハ回転数とノズル旋回動作によってエッチング量がコントロールができるかが課題と 考える。

2. スピンコーターへの応用

本研究開発装置の応用としてレジストのスピンコートが考えられる。特に角形(矩形)基板の場合には、 コーナー部の周速が大きいため気流が乱れ膜厚均一性が悪くなる課題がある。

本研究開発装置の原理によれば減圧によって乱気流発生が抑えられ良好な膜厚分布が得られると考え られる。また回転ローターのスリットからレジストが速やかに排出されるので、跳ね返りによる再付着等 もないことが期待できる。

4-2 事業化の展開

1. 同一装置でレジスト剥離、バックエッチング、洗浄・乾燥処理をする装置

既存顧客への営業展開や展示会来場者(2017 JPCA Show)から得た関心事項、要望技術を整理・分析し事業化の展開に向けて取組んでいる。

具体的には電子部品メーカー(A 社)及びフォトマスクメーカー(B 社)ではレジスト剥離プロセス、レジ スト残渣への対応が課題となっている。両社は薬液の選定やプロセス条件の見直し等の従来のアプローチ では著しい状況の改善が見られておらず、新しい手法として本装置に興味をもっていただいた。本事例か らも高アスペクト比のパターンに限らず用途展開が可能と思われる。

半導体実装メーカー(C 社)はチップと基板との狭いギャップスペースのフラックス洗浄に課題がある。 同業メーカー(D 社)においてもフラックス洗浄において従来意図していなかったレベルの洗浄品質を要 求される状況になっている。さらにはコストもかけられない状況であり、量産性と低コスト化の両方が課 題とのことである。半導体パッケージや電子部品は高密度化、狭ピッチ化、微細化が進んでおり、この分

野でのニーズも高いと思われる。

また、アドバイザーである富士電機津軽セミコンダクタ株式会社様からもご指摘をいただいているが、 事業化を進め、顧客展開を広げるためには量産性への対応も重要なポイントになると考えている。装置の 操作性、メンテナンス性等を改善していくだけでなく、ユーザー目線での装置開発を進め、スループット の改善や歩留りの向上など各顧客の生産性向上に寄与できる装置の開発を意識し、スピード感を持って事 業化を進めていきたい。

以上

参考文献

- 1) 藤田 隆:半導体素子の多層配線形成における平坦化研磨技術に関する研究,, 熊本大学学術リポジ トリ(2004).
- 2) 杉田義弘,渡辺悟:表面化学 Vol.16, No.8, pp.521-529, 1995.