

HFガスを用いたSiO₂のバッチ式等方性 ガスエッチング装置の開発

橋本篤明^{*1}・佐藤正幸^{*2}・堤賢吾^{*2}・
井上寛揚^{*2}・小野洋平^{*2}・本田和広^{*1}・隣嘉津彦^{*1}

Development of Batch Type Isotropic Gas Etching System Using HF Gas

Atsuaki HASHIMOTO^{*1}, Tadayuki SATO^{*2}, Kengo TSUTSUMI^{*2},
Hiroaki INOUE^{*2}, Yohei ONO^{*2}, Kazuhiro HONDA^{*1}, Kazuhiko TONARI^{*1}

^{*1}Institute of Advanced Technology, ULVAC, 1220-1 Suyama, Susono, Shizuoka, 410-1231, Japan

^{*2}Semiconductor Equipment Division, ULVAC, 1220-14, Suyama, Susono, Shizuoka, 410-1231, Japan

We have developed a new batch-type isotropic gas etching system that does not utilize H radicals. The isotropic gas etching process is used in semiconductor manufacturing to etch pattern structures and requires high-aspect ratio etching without causing damage to the underlying layer. Our previous release, [RISE-300], was a batch-type gas etching tool that utilized H radicals and was easy to handle due to the absence of highly corrosive gases like HF. However, it was difficult to control the etching distribution within a batch. In recent years, conventional processes have become insufficient to meet the performance requirements of device manufacturers. Our new batch-type isotropic gas etching process, which does not utilize H radicals, outperforms conventional methods in terms of wafer-to-wafer uniformity and step coverage. Additionally, this new process allows for precise control of etching distribution within the wafer plane.

1. はじめに

NANDとDRAMの技術は、デバイス構造の3次元化やトランジスタ構造の高密度集積化によって発展を続けてきた。3D NANDでは、更なる大容量化のために、デバイス構造の積層数を増やしている。3Dデバイスのような高アスペクト比を持つ構造を均一に処理する手段として、シリコンの自然酸化膜除去プロセスなどで使用されるHFとNH₃の化学反応を利用したガスエッチングプロセス（以下等方性ガスエッチングプロセスと表現する）を用いることができる。実際に、3D NANDのチャンネルホール底面に生成する自然酸化膜の除去には、同プロセスが用いられている。3D NANDのデバイス構造が進化するにつれ、カバレッジ性能は勿論、ウェーハ間のエッチング量分布の均一性やウェーハ面内のエッチング量均一性についても、要求が高まりつつある。本記はこのバッチ式等方性ガスエッチングプロセスにおいて、より高いプロセス性

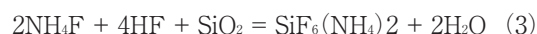
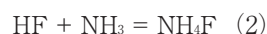
能を達成するための開発内容を記載する。

2. SiO₂のバッチ式等方性ガスエッチングプロセス

本項では従来のバッチ式等方性ガスエッチングプロセスと新方式との違いについて述べ、プロセス性能の基礎評価結果の比較を記載する。

2.1 水素ラジカルを使用した従来方式のプロセス

従来方式のプロセスでは、エッチャントを生成するため水素ラジカルを使用する¹⁾。詳細説明のために、プロセスの化学反応式を以下に示す。



上記式(1)~(3)において、水素ラジカルは式(1)に示されるHF分子の生成工程に寄与する。式(2)において生成したHF分子とNH₃分子が反応し、NH₄F分子となる。このNH₄F分子がエッチャントとしてSiO₂と反応し、SiF₆(NH₄)₂に変質させる。SiF₆(NH₄)₂は真空チ

^{*1} (株)アルバック 先進技術研究所
(〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-1)

^{*2} (株)アルバック 半導体装置事業部
(〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-14)

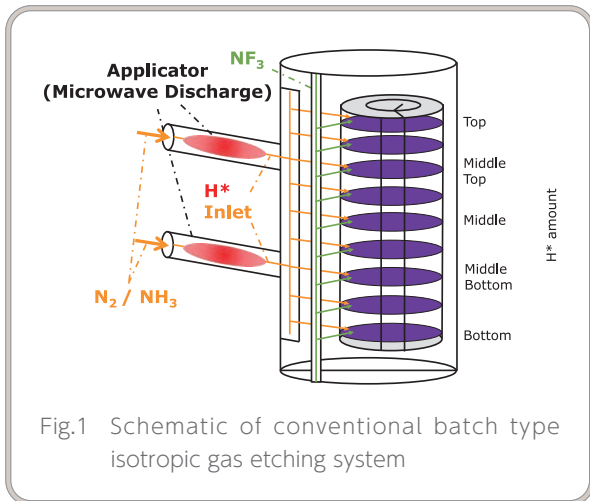
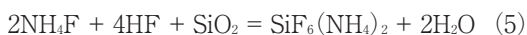
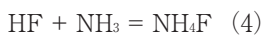


Fig.1 Schematic of conventional batch type isotropic gas etching system

チャンバー内での加熱により蒸発し、ウェーハ表面より除去される。ここまでの工程でSiO₂のエッチングが完了する。このプロセスの装置構成をFig.1に示した。上記(1)~(3)の反応を反応室内の気相中・またはウェーハ表面で起こるようにするため、アプリケーションより導入される水素ラジカルを含む混合ガスは、分散機構を介して反応室内へ導入され、別系統より導入されたNF₃ガスと混合される装置構成となっている。縦型ポート上に57枚のウェーハが配置され、ウェーハ1枚につきそれぞれのガス導入口が配置される。この57枚のウェーハについて、上から順にTop/Middle Top/Center/Middle Bottom/Bottomという5つの領域を定義する。Middle TopおよびMiddle Bottomはアプリケーション正面に配置された領域となる。これらに記載の従来方式のプロセスでは、水素ラジカルが直接ウェーハに吹き付けられることで生じる問題がある。内容については2.3および2.4にて記述する。

2.2 水素ラジカルを使用しない新方式のプロセス

新方式のプロセスでは、エッチャントを生成するための手法としてHFガスを使用する。詳細説明のために、プロセスの化学反応式を以下に示す。



上記式(4)~(5)は従来方式のプロセスにおける式(2)~(3)と同じであり、従来方式のプロセスと異なる点は、水素ラジカルを使用した式(1)の反応の有無になる。この装置構成をFig.2に示した。HF分子はガスとして直接供給されるため、水素ラジカルを供給する必要がなくなる。別系統から導入されるHFガスとNH₃ガスを処理室内の気相中・またはウェーハ表面で

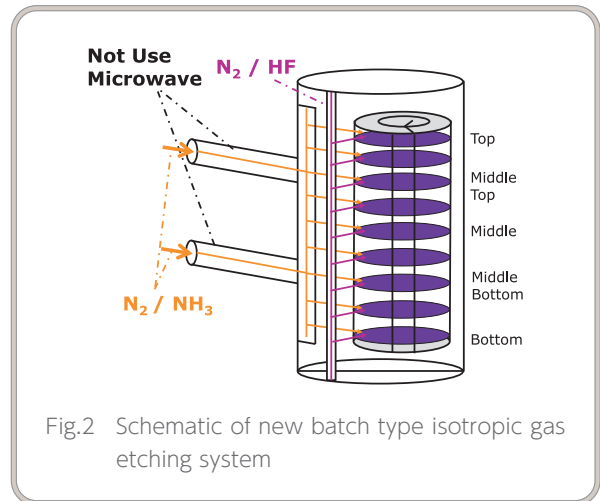


Fig.2 Schematic of new batch type isotropic gas etching system

反応させ、エッチャントを生成する。従来方式のプロセスと同じく、57枚のウェーハとガス導入口が配置される。これらに記載の新方式のプロセスでは、水素ラジカルが直接ウェーハに吹き付けられることは無い。

2.3 水素ラジカルとウェーハ昇温

2.1および2.2に示す従来方式と新方式の違いは、水素ラジカルの有無である。従来方式のプロセスでは、活性状態のままウェーハ表面に吹き付けられた水素ラジカルは、失活時の熱の受け渡しによって、ウェーハの昇温を引き起こす。昇温レートは水素ラジカル量に比例し、より水素ラジカルが吹き付けられる領域では、エッチング中のウェーハ温度が上昇する。領域ごとに吹き付けられる水素ラジカル量分布の模式図をFig.3に示した。アプリケーション正面に配置されているMiddle Top及びMiddle Bottom領域では、他領域よりも多くの水素ラジカルが供給される。これにより他領域に対し相対的に高い温度でエッチングが実施され、プロセ

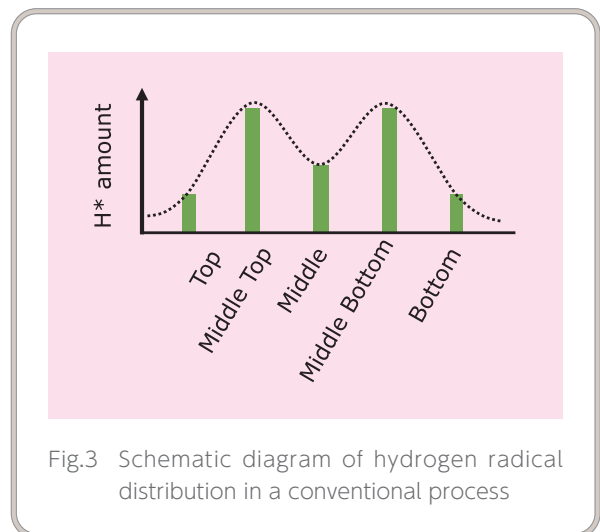


Fig.3 Schematic diagram of hydrogen radical distribution in a conventional process

ス性能に悪影響を与える。一方新方式のプロセスでは水素ラジカルの供給が無いため、水素ラジカルを原因とした温度分布は生じない。Fig.4にエッチング中のウェーハ温度の実測値をプロセス方式毎に示す。従来方式のプロセスでは、アプリケーション正面とそれ以外の領域にて温度差が見られ、水素ラジカルの影響が表れていることがわかる。

2.4 ウェーハ間の温度分布とエッチングレート分布

本プロセスはエッチャントとなる NH_4F 分子の、ウェーハ上への吸着律速となる温度領域を使用しており、温度上昇とともにエッチングレートが低下する。Fig.5に本プロセスにおける温度とエッチングレートの関係を示した。Fig.4の結果とFig.5の関係性から、よりウェーハ間の温度分布が小さい新方式のプロセスでは、より良いウェーハ間でのエッチングレートの均一性を期待することができる。さらにエッチング量のウェーハ間分布の比較をFig.6に示す。新方式は、アプリケーション正面のエッチング量が増加し、均一性が改善していることがわかる。

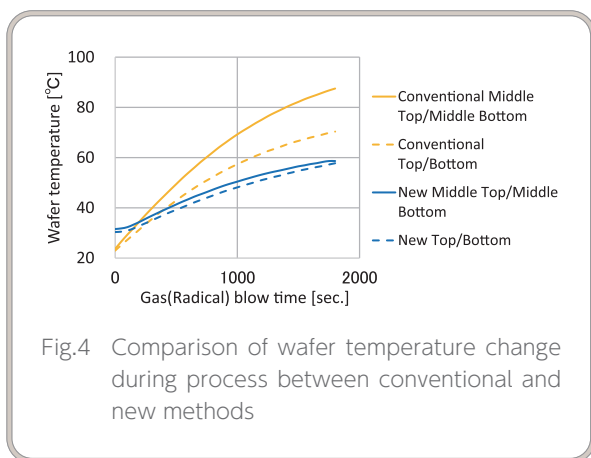


Fig.4 Comparison of wafer temperature change during process between conventional and new methods

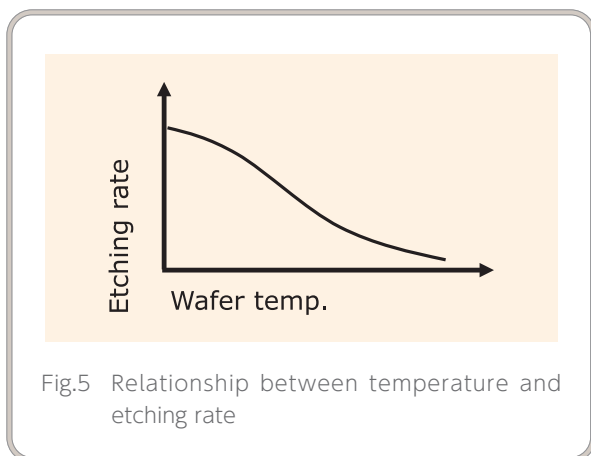


Fig.5 Relationship between temperature and etching rate

2.5 エッチングレートの膜種選択性

Fig.7にFig.6と同一条件で処理を行った際の SiN 膜および $Poly-Si$ 膜とのエッチング選択性を示す。従来方式のプロセスに対し、新方式のプロセスでより選択的に SiO_2 膜をエッチングしていることがわかる。これは、式(1)に記載の F を含んだ活性副生成分子が SiN 膜および $Poly-Si$ 膜に対するエッチャントとして働いていることを示している。本プロセスを使用する工程では、 SiO_2 のエッチングと同時に微量の Si 部をエッチングすることが要求される場合もあり、従来方式のプロセスと新方式のプロセスとの組み合わせによって、広いマージンを持ったプロセスが提供可能となる。

3. 高アスペクト比構造処理時のステップカバレッジ

本プロセスは高いアスペクト比構造の処理を行う用途が多いため、エッチング量のステップカバレッジが

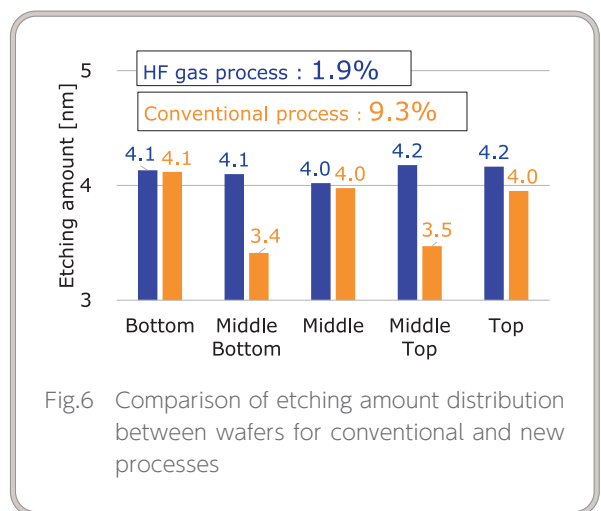


Fig.6 Comparison of etching amount distribution between wafers for conventional and new processes

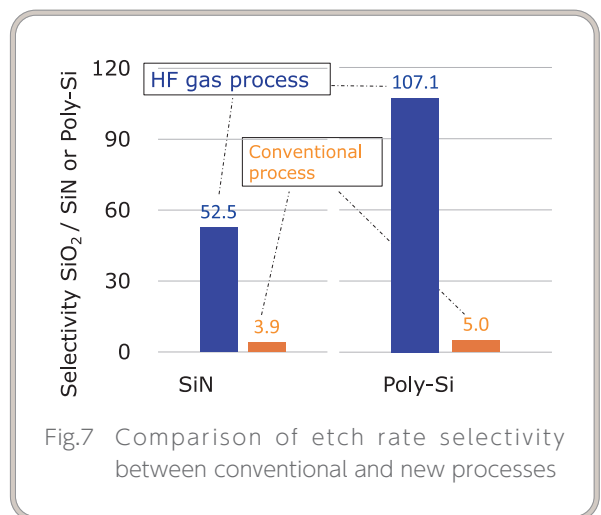
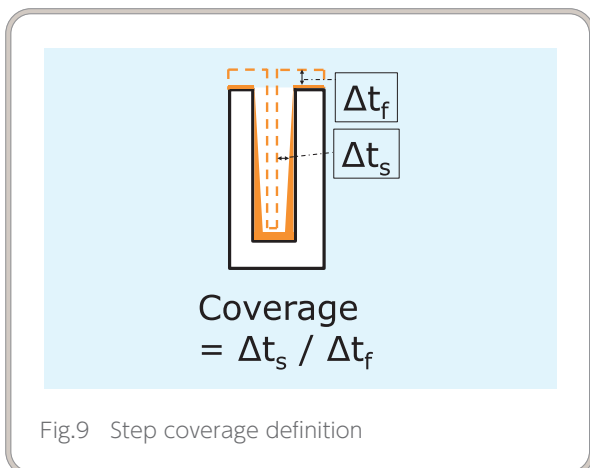
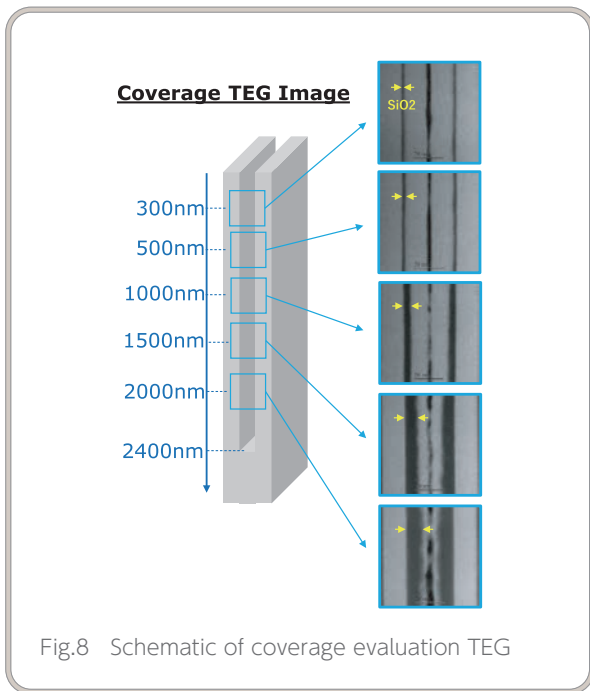


Fig.7 Comparison of etch rate selectivity between conventional and new processes

プロセス性能として重要となる。本項では、上述の従来方式のプロセスとHFガスを使った新方式のプロセスのステップカバレッジの性能と、ステップカバレッジ向上のための手法について紹介する。

3.1 従来方式のプロセスと新方式のプロセスのステップカバレッジ性能

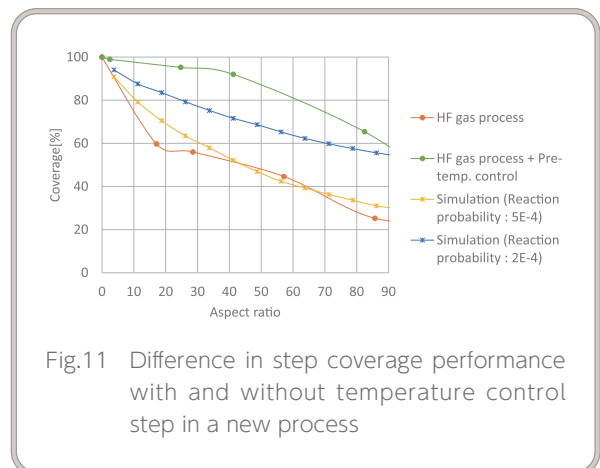
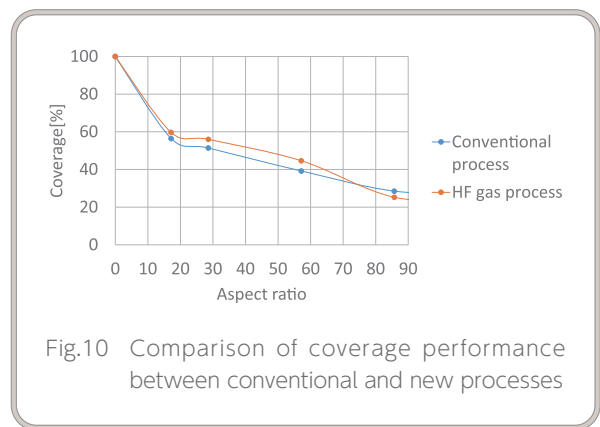
カバレッジ性能の評価を実施するため、高アスペクトトレンチ形状のTEGを作製した。TEGの模式図と評価時に使用したエッチング後のTEGを断面方向より観察した際のTEM像をFig.8に示す。断面TEM像が示すように、トレンチ深さ方向に対してSiO₂の膜厚が増加していることがわかるが、これはエッチング量がパターンの深さに対して減少しているからであり、このエッチング量の深さ方向に対する減少量を定量化す



ることで、ステップカバレッジの性能を評価できる。本記ではFig.9のようにあるトレンチ深さでのエッチング量 t_s とトレンチ領域外のエッチング量 t_f の比率を、カバレッジ性能と定義した。Fig.10にFig.6に示した結果と同一条件で処理を行った際のカバレッジ性能の結果の比較を示す。この結果では、カバレッジ性能に差は見られない。水素ラジカルによるHF分子の生成、またはHFガスの直接供給という違いはあるが、エッチングの化学反応は同じであるためだと考えられる。

3.2 ステップカバレッジの改善

当社では本プロセスのステップカバレッジを改善する手法を開発した。この手法では、エッチング処理を行う前にウェーハ温度を所定の温度へと調整したのちにエッチングステップを開始することで、ウェーハ上へのエッチャント吸着確率を調整しステップカバレッジを向上させる。評価結果をFig.11に示した。温調ステップの追加により、カバレッジが改善していることがわかる。さらにモンテカルロシミュレーションによるステップカバレッジの予想結果と比較したところ、温調ステップが無い結果は吸着確率が 5×10^{-4} のシミュレーション結果とほぼ一致している。このことから



カバレッジは、エッチャントの吸着確率に依存していることがわかる。一方温調ステップを追加した結果は、減少曲線の形はやや異なるが、吸着確率がモンテカルロシミュレーションの 2×10^4 の減少曲線により近い結果となっており、この時のエッチャントの吸着確率は温調ステップが無いプロセスの1/2以下になると予想される。上記のように、カバレッジ性能は温度で変化するため、温度管理が重要になる。第2項で記述したように、従来方式のプロセスにおいては、エッチング温度のコントロールが水素ラジカルの影響により困難であり、この点を踏まえるとステップカバレッジの性能においても、新方式のプロセスは優位性がある。

4. 新規ハードウェア開発：面内分布調整機構

本項では、新方式のプロセス向けに新たに開発したウェーハ面内でのエッチング分布を調整する機構を紹介する。本機構は、バッチ式装置で常に課題となるパターンローディング現象への効果的な対策となる。

4.1 パターンローディング現象

バッチ式等方性ガスエッチング装置では、Fig.1およびFig.2に示すように、エッチングガスを回転ポート上に設置されたウェーハに横から吹き付ける。ポートは回転しているためウェーハ面内は回転対称なエッチング分布となるが、外周部と中心部でエッチング量の分布が発生してしまう。これはエッチャントが消費されながら排気ポートへ進むことで、ウェーハ面内で

エッチャント分圧が変化することで発生する。当然この分布の不均一性は、エッチャントを消費するウェーハ表面積が増加するほど大きくなる。この現象をパターンローディング現象と言う。Fig.12に本現象についての概略図を記載する。デバイス作成工程においては様々なパターン形状を持つウェーハを処理するため、処理対象毎に本現象の程度が変化する。そのため、本現象の程度に合わせて調整が可能な対応手法が必要となる。

4.2 面内分布調整機構

HFガスを使用した新方式のプロセスにおいて面内のエッチャント分圧を連続的に調整する手法を開発した。概略図をFig.13に示す。この手法は、処理室内でエッチャントの原料ガスを混合する本プロセスの特徴を利用し、原料ガス同士の混合位置を変化させることでウェーハ面内のエッチャント分圧を調整する。具体的には、新方式のプロセスにおいては、平行に配置されたHFガス導入口とNH₃ガス導入口の距離を連続的に変化させることで、ウェーハ面内におけるNH₄F分圧のピーク位置を連続的に調整する。HFガスとNH₃ガスの導入間距離と、中心部と外周部のエッチング量の比の関係をFig.14に示す。各ガスの導入口の距離に対し、線形性を持って面内のエッチング量分布が変化していることがわかる。パターンローディング現象の影響の大きさに合わせて本機構により面内のエッチャント分圧を制御することで、異なる表面積を持つさまざまなパターンウェーハに対して均一にエッチングすることができる。

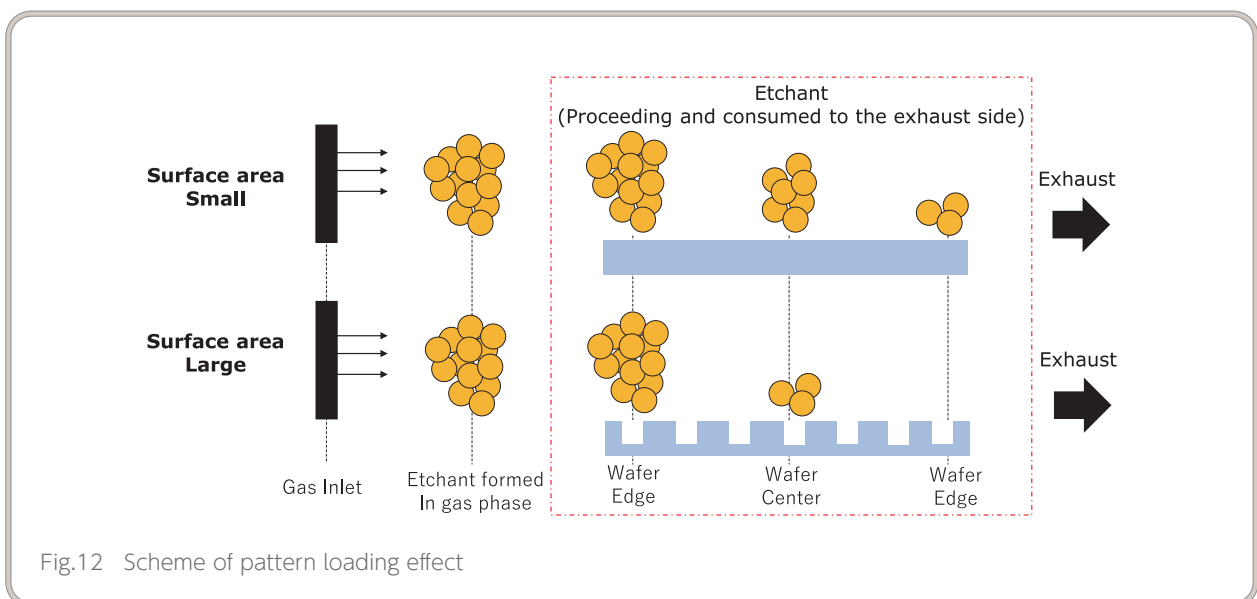


Fig.12 Scheme of pattern loading effect

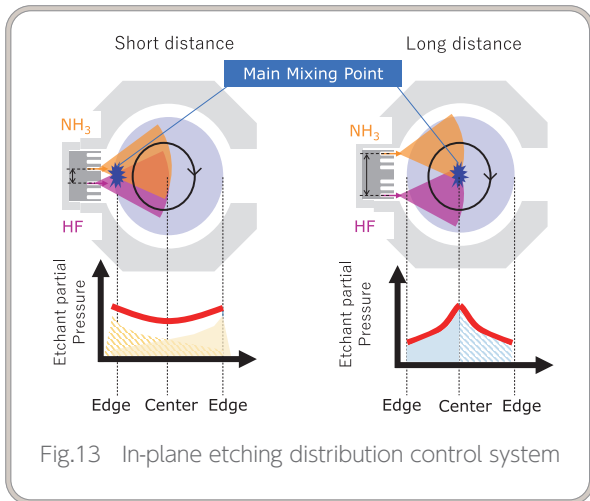


Fig.13 In-plane etching distribution control system

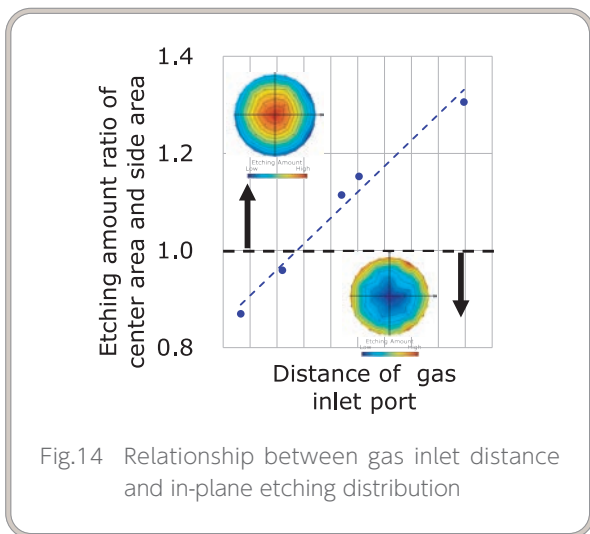


Fig.14 Relationship between gas inlet distance and in-plane etching distribution

5. まとめ

水素ラジカルを使用しない新方式のバッチ式等方性ガスエッチング装置を開発した。この新方式のプロセスを評価し、従来方式と比較したところ、ウェーハ間のエッチング量およびカバレッジの均一性において、新方式のプロセスが従来方式を上回る結果を達成した。さらに、基板面内のエッチング分布を任意に制御する手法を新たに開発した。

文献

- 1) W.-S. Kim, W. G. Hwang, I.-K. Kim, K.-Y. Yun, K. M. Lee and S.-K. Chae, Solid State Phenom., 2005, 103-104, 63-66
- 2) Matsugi, Akira, et al. "Gas-phase reaction mechanism in chemical dry etching using NF3 and remotely discharged NH3/N2 mixture." RSC Advances 10.51 (2020) : 30806-30814.