

プラズマを用いたポリシリコンゲート電極の  
微細加工の研究

2007年8月

後藤 剛

## もくじ

<b>1 研究の背景</b>	<b>1</b>
1. 1 CMOS ロジック LSI の MOSFET トランジスタのゲート加工技術	2
1. 2 レジストトリミング技術	3
1. 3 アドバンスドプロセスコントロール	4
1. 4 ゲートエッチングプロセスでのレジストトリミングの APC	5
1. 5 プラズマチャージングによるゲートのエッチング形状異常	6
1. 6 研究の目的	6
<b>2 ゲート長 40nm トランジスタの SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの レジストトリミング技術の開発</b>	<b>11</b>
2. 1 序論	12
2. 2 ゲートエッチングの装置とプロセスのフロー	13
2. 3 SO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術	13
2. 4 SO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> プラズマでエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由	16
2. 5 まとめ	17
<b>3 ゲート長 40nm トランジスタのアドバンスドプロセスコントロールによる ゲート加工ばらつきの制御</b>	<b>27</b>
3. 1 序論	28
3. 2 ゲートエッチングプロセスの APC システム	29
3. 3 hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタ 量産ラインでの検証実験	31
3. 3. 1 検証実験の方法	31
3. 3. 2 検証結果	33
3. 3. 3 APC のフィードバックの効果に関する考察	34
3. 4 まとめ	36
<b>4 SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>、ICP プラズマの In-situ 計測</b>	<b>47</b>
4. 1 序論	48
4. 2 実験装置と実験方法	49
4. 3 実験結果と考察	50
4. 3. 1 実験の条件について	50
4. 3. 2 レジストのエッチングレートの異方性	51
4. 3. 3 プラズマ中の正イオンと中性の活性種	51

4. 3. 4	レジストエッチングの反応生成物	52
4. 3. 5	レジスト膜表面の化学組成変化	53
4. 4	考察	54
4. 5	まとめ	55
<b>5</b>	<b>プラズマチャージングの In-situ 計測</b>	<b>66</b>
5. 1	序論	67
5. 2	実験装置、実験方法	68
5. 3	実験結果と考察	70
5. 3. 1	プラズマチャージングによる電子電流の減少と チャージング電圧のアスペクト比依存性	70
5. 3. 2	パターン側壁の電位	71
5. 3. 3	チャージング電圧の電子温度依存	72
5. 3. 4	チャージング電圧のイオンエネルギー依存	74
5. 4	まとめ	75
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>85</b>
	<b>[本研究に関連した発表]</b>	<b>88</b>
	<b>[謝辞]</b>	<b>90</b>
	<b>[参考文献]</b>	<b>91</b>

## 第1章

### 研究の背景と目的

## 1 研究の背景

### 1.1 CMOS ロジック LSI の MOSFET トランジスタのゲート加工技術

CMOS ロジック LSI は、高い速度性能が求められるコンピューターネットワーク上のサーバーの CPU だけでなく、低い待機時消費電力が求められる PC の CPU やデジタルカメラ、そして携帯電話などのデジタル家電製品などに応用され、近年、その需要は急激に拡大している。CMOS ロジック LSI に使われているトランジスタの速度性能はトランジスタの物理ゲート長に大きく依存する。ここで“物理ゲート長”とはゲートエッチングプロセス後の寸法で決まるゲート長を意味する。半導体デバイスメーカーでは CMOS トランジスタの性能の向上のためにトランジスタの物理ゲート長のスケールリングが継続的に行われている。図 1-1 にはトランジスタの物理ゲート長のトレンド予測のグラフを示した。トランジスタの物理ゲート長のスケールリングは、hp180nm 技術世代まで光リソグラフィーの露光光源の短波長化によるフォトレジストパターンの最小加工寸法の微細化に依存してきた。ここで“hp”とは DRAM 配線のハーフピッチを意味する。ところが hp130nm 技術世代以降では、実際に作られたトランジスタの物理ゲート長は光リソグラフィーの最小加工寸法の進歩から予測された物理ゲート長の予測トレンドよりも微細化されている。これはフォトレジストパターンの最小加工寸法を超える微細な物理ゲート長のトランジスタの開発が行われるようになったことを意味する。現時点では、hp 90nm、あるいは hp 65nm 技術世代で物理ゲート長 50nm 以下のトランジスタの製造が行われようとしている。この急激な物理ゲート長のスケールリングの背景は、トランジスタの物理ゲート長以外のパラメータのスケールリングが回路性能の向上に貢献しなくなってきたため、さらなる物理ゲート長のスケールリングに頼らなければ回路性能を向上させることができなくなったことが挙げられる。

ところでトランジスタの物理ゲート長を短くするとトランジスタの駆動電流の増大により速度性能は向上するが、物理ゲート長が短すぎるとリーク電流の増大により待機時消費電力が増大し歩留まりが低下する。逆に、トランジスタの物理ゲート長を長くすればリーク電流の減少により待機時消費電力が減少するが、駆動電流の減少により速度性能が低下し、歩留まりが低下する。したがって CMOS ロジック LSI の量産ラインでは、CMOS ロジック LSI 回路の中の全てのトランジスタの物理ゲート長は、ある一定の範囲内に収まるように制御されなければならない。近年の急激な物理ゲート長のスケールリングは、光リソグラフィーによる物理ゲート長の制御をよりいっそう厳しくした。hp130nm 技術世代以降のトランジスタのような高解像力を必要とされる露光では、光リソグラフィーの焦点深度（フォーカスマージン）が解像度の 2 乗に反比例するため焦点深度が大変狭く、フォーカスエラーによるフォトレジストパターンの寸法誤差の影響が大きくなったからである。

したがって、CMOS ロジック LSI の速度性能を向上させながら高い製造歩留まりを確保するためには、物理ゲート長をフォトレジストパターンの寸法を超えて微細化する技術とともに、トランジスタの物理ゲート長の加工精度を向上させる技術が必要である。そのため、

物理ゲート長をフォトレジストパターンの寸法を超えて微細化するレジストトリミング技術がゲートエッチングプロセスで使われるようになった。また前工程のプロセス結果を次工程にフィードフォワードし、さらに過去のプロセス結果を次工程にフィードバックすることによりプロセス制御性を高めるアドバンスドプロセスコントロール (Advanced Process Control)の技術が半導体のプロセスで使われるようになった。次に、レジストトリミング技術とアドバンスドプロセスコントロールについて述べる。

## 1. 2 レジストトリミング技術

最新の ArF エキシマーレーザー光(波長 193 nm)を露光源とする露光装置では、ドライで 64nm ~ 86nm の範囲の幅のフォトレジストパターンを形成できる。hp 90nm の技術世代では、フォトレジストパターンの最小寸法よりもさらに小さな物理ゲート長のゲート電極が作られており、ゲートエッチング後の最終物理ゲート長は 37 ~ 45 nm である。露光プロセスによるフォトレジストパターン寸法をゲートエッチングにより下位のポリシリコン層に転写する前に、フォトレジストパターンをトリミングする。図 1-2 はポリシリコンゲート加工の一例を示したものである。レジストトリミング技術は回路密度を向上させて回路チップ全体の大きさを小さくすることはできない。フォトレジストのラインパターン幅をトリミングすると、トリミング量に応じてライン間のスペースが増加するだけである。したがって露光プロセス後のラインパターンのピッチ (hp 90nm の技術世代で 180nm) はトリミング後も維持される。この理由により、レジストトリミング技術は、高集積度の DRAM を製造する目的には用いられないが、ArF エキシマーレーザー光の露光装置より解像性が高い装置、例えば F2 エキシマーレーザー光や EUV 光の露光装置がなくても、より高速な MOS トランジスタの製造が可能になるため、処理スピードが要求される MPU などのロジック製品に用いられる。

これまでフォトレジストパターンのトリミングには O<sub>2</sub> ガスのプラズマが用いられてきた。フォトレジストパターン層の直下には露光プロセスでの解像度を向上させるため反射防止膜 (BARC : Bottom Anti-Reflective Coating) の層が用いられるが、両者ともに材質が有機物である。そのためトリミングの際に反射防止膜もフォトレジストと同時にエッチングされる。フォトレジストパターンは、後続のゲートエッチングプロセスに十分なフォトレジストパターンを残すためにトリミング後のフォトレジストパターンの高さの減りがある程度抑えながらトリミングされなければならないが、パターンのアスペクトが高すぎるとパターン倒れが起きてしまう。したがってプラズマレジストトリミングはウェハに対して垂直方向 (V : Vertical) と、横方向 (L : Lateral) とのエッチングレートを個別に制御することが必要となる。そのため誘導結合型プラズマエッチング装置 (ICP : Inductively Coupled Plasma) が一般的に使われている。図 1-3(a)で示した ICP を用いることで、イオンエネルギーをパラメータにして、垂直方向と横方向のエッチングレートを別個に制御できる。ICP ではシリコン基板に入射するイオンフラックスを ICP パワーにより、イオンエネルギーを

バイアス (Bias) 電圧により制御可能である。なぜならば、イオンフラックス (イオン密度) を制御するプラズマ源とイオンエネルギーを制御する基板バイアスが分離されているからである。図 1-3(b) で示した従来の平行平板型プラズマ装置では両者の機能が分離していないためレジストトリミングには向かない。従来の酸化膜やゲートのエッチングでは微細パターンに入射するイオンの指向性を増大させるため、低い圧力の下で高いイオンエネルギーを得るために高いバイアス電圧が必要であったが、レジストトリミングではレジストのエッチング耐性が小さいこと、そしてイオンの指向性に関する制御性が要求されることから、シリコン基板に印加するバイアス電圧は 100V 程度である。

### 1. 3 アドバンスドプロセスコントロール

アドバンスドプロセスコントロール (以降 APC と略す) とは、所望のプロセス結果を達成するためにどのように装置を制御したらよいかを自動的に決定するための制御の方法である。図 1-4 の APC の概念図に示されるように、APC は処理されるロットに帰属する情報 (Info on Lot、例えばデバイスの種類)、ねらい値 (Targets)、そして装置からの計測情報 (Data) に基づき、モデル (Model) と制御ストラテジ (Control strategy) を使って、装置のレシピ (Recipe)、すなわち設定の集まり (Settings) の中の値を決定し、そのレシピでプロセスを装置に実行させる。APC は、プロセスコントロール (Process Control) の他に、エラー検出 (Fault detection)、エラーの種類の分別 (Fault classification)、エラー予測 (Fault prognosis) の 3 つの機能を盛り込んだ、ハードウェアとソフトウェアから成る自動化されたシステムである<sup>1</sup>。APC のシステムは、できる限り自動で処理するために、その装置で所望の結果が達成可能かどうかを判断し、達成できない場合はオペレーターに装置メンテナンス (Maintenance) が必要なことを知らせるといった機能も備える。

図 1-5 には APC の制御ダイヤグラムを示した。一般的に制御のタイプは、時間スケール (Time scale) により、ランツールン (RtR : run-to-run) とリアルタイム (Real-time) の二つに、そして制御構造 (Control structure) により、監視制御 (Supervisory control) と安定化制御 (Regulatory control) の二つに分類される。従来のプロセス装置はリアルタイムの安定化制御の形をとる。例えば図 1-5 の右側で示されるように、リアルタイム安定化制御のコントローラ (Regulatory controller) は、1 回の処理の間、プロセスの状態が設定値 (Settings) に追従するように、プロセスを連続的にフィードバック制御する。一方 APC はランツールンの監視制御の形をとる。図 1-5 の左側で示されるように、ランツールン監視制御のコントローラは、一回の処理 (ロットあるいはウェハ) ごとに、フィードフォワード (Feedforward)、フィードバック (Feedback) されるロットの計測情報を解析し、モデル (Model) を使って設定値 (Settings) を計算し、そしてプロセス装置のリアルタイム安定化制御のコントローラにその設定値を渡す。APC はランツールンの制御であるので、インラインの計測装置からのロットの計測情報 (In Line Data) だけでなく、インラインでない計測装置からのロットの計測情報 (Ex Situ Data) をもコントローラにフィードバックさ

せることができる。

APCには、プロセスパラメータ(例えばエッチング装置ならばICP電力、バイアス電圧、圧力、ガス比)を入力変数とし、インラインの計測装置から得られる出来ばえ情報(例えばゲートエッチングでは物理ゲート長)を出力変数とした1入力1出力、あるいは多入力多出力の制御アルゴリズムとしてのモデル(model)が組み込まれる。モデルは、理想的には装置内の物理現象を再現できるシミュレーションで導出する方法(プロセスエンジニア的なアプローチ)、あるいは装置の動作特性を再現できるモデルを使い装置に学習させて導出する方法(コントロールエンジニア的なアプローチ)で導出されるのが好ましいが、現状ではプロセス装置でのパラメータ振りの実験により導出される。

#### 1. 4 ゲートエッチングプロセスでのレジストトリミングのAPC

上記のレジストトリミング技術とAPCの技術の二つをゲートエッチングに応用すれば、物理ゲート長をフォトレジストパターンの寸法を超えて微細化できるとともに、トランジスタの物理ゲート長の加工精度を向上させることができる。ゲートエッチングのAPCのコンセプトは、S. Ruegsegger<sup>2</sup>により初めて提案された。図1-6はS. Ruegseggerの制御ダイヤグラムである。S. RuegseggerのAPCのモデルは、SEMで測定されたエッチング前のフォトレジストパターン幅の値をコントローラにフィードフォワードし、ゲートエッチングのバイアス電力(RIE Etch Bias)を最適化することで、所望の物理ゲート長のトランジスタを達成できるというものである。そして2000年以降になって、KrFエキシマーレーザー光(波長248nm)のフォトレジストを用いたhp 130nm技術世代で、物理ゲート長90nmのトランジスタのレジストトリミングを使ったゲートエッチング加工のAPCが報告された<sup>3,4,5</sup>。これらの報告では、レジストトリミングのトリミング時間を最適化することで、ポリシリコンのトランジスタの物理ゲート長の加工精度を向上させることが可能であるということが、少数の処理ロットの結果について示されている。

しかし、これまでのレジストトリミングのAPCには次の二つの課題がある。第一に、物理ゲート長50nm以下のトランジスタの量産ラインで、物理ゲート長のロット間のランダムなばらつきが解決できていないことである。ここでロットとは量産ラインでのウェハ処理の単位であり、1ロットはウェハ25枚から成る。この物理ゲート長のロット間のランダムなばらつきには、リソグラフィー起因のばらつきとエッチング起因のばらつきが含まれる。リソグラフィー起因のばらつきとしては、hp 90nm技術世代のトランジスタのような高解像力を必要とされる露光で焦点深度が大変狭いために、より顕著になったフォーカスエラーによるばらつきが挙げられる。一方、エッチング起因のばらつきとしては、エッチング処理を繰り返していくうちにエッチング装置の壁に堆積するエッチング反応生成物の影響で起こる、エッチングレートの長期変動<sup>6,7</sup>によるばらつきが考えられる。

第二に、レジストトリミングに起因する疎密パターン間のトリミング量の差によるシステムティックな物理ゲート長のばらつきが解決できていないことである。O<sub>2</sub>プラズマでレ

レジストトリミングを行った場合、孤立して配置されたゲートパターンと密集して配置されたゲートパターンとの間で、エッチングのマイクロローディング効果と考えられる効果によりトリミング量にバイアス（差）が生じてしまう。さらに APC でトリミング時間を振ってレジストパターンの寸法を調整しようとするすると疎密パターン間のエッチングバイアスが変化してしまう。

これまで上記の二つの課題を同時に解決するレジストトリミングのアドバンスドプロセスコントロールは実現されていない。

### 1. 5 プラズマチャージングによるゲートのエッチング異常形状

1980 年代、プラズマを用いたエッチングプロセスのドライ化によりエッチングの転写精度が向上し最小加工寸法が  $1\mu\text{m}$  まで微細化された。さらに、1990 年代に入り最小加工寸法が  $1\mu\text{m}$  を切るようになると、より具体的には hp 350nm、250nm の技術世代になると、プラズマエッチングプロセスで、プラズマチャージングによるゲートのエッチング形状異常やゲート酸化膜のチャージングダメージが問題となるようになった。

プラズマチャージングとは、プラズマに接するシリコン基板上の微細絶縁物パターンの上部が負にチャージアップし、パターンの底に流れ込む電子電流が減少する現象であると考えられている。そしてパターンの底で電子電流が減少した結果、正イオン電流が過剰となってパターンの底が正にチャージアップし、その正のチャージに反発する形で正イオンの軌道が歪むのではないかと考えられている（図 5-1 参照）。この正イオンの軌道の歪みが、ゲートエッチングでゲートの根元の部分に切れ込みが入る、ノッチングと呼ばれるゲートのエッチング形状異常を引き起こすのではないかと考えられている。ゲートのエッチング形状異常は物理ゲート長のエッチング誤差の主要因である。そしてこれは物理ゲート長のスケーリングによりますます深刻になる可能性があり、回避する方法を確立することは大変重要である。

しかし、プラズマチャージング現象自体、すなわちゲートパターンの底でプラズマからの電子電流が減少し、ゲートパターンの底が正にチャージアップすることについては、実験で調べられてはいない。さらにプラズマチャージングの大きさを定量的に評価し、そのプラズマパラメータに対する変化についても調べられてもいない。これらはプラズマチャージングによるダメージを回避するために必要な知見である。

### 1. 6 研究の目的

本研究の目的は、大きく分けて二つある。第一に、ArF エキシマーレーザー光（波長：193 nm）を露光源としたリソグラフィーのレジスト（パターン幅：80 nm）を用いた hp 90nm の技術世代において、ゲート長 40 nm トランジスタの物理ゲート長の加工精度（精密度（Precision）ならびに正確度（Accuracy））を向上させることである。そのためにはレジストパターンをリソグラフィーの最小加工寸法を超えて微細化するだけでなく、トランジスタ回路のパターン疎密に依存せずに、ロット単位で、物理ゲート長をねらい値に近づけ、

物理ゲート長のばらつきを抑制する必要がある。そこで、パターン疎密に依存せずにゲートのレジストパターンをトリミングすることが可能な、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミング技術を開発した。そして、そのレジストトリミング技術を使った、ゲートエッチングのアドバンスドプロセスコントロール (APC) 技術を確立した。さらに  $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミングのメカニズムを明らかにするため、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマの正イオン、中性の活性種、エッチング反応生成物、そしてレジスト表面の化学組成を In-situ 計測し、それらとレジストトリミング量との相関を調べた。

第二に、物理ゲート長のエッチング誤差の主要因の一つである、ゲートのエッチング形状異常を回避するため、プラズマチャージングのメカニズムを明らかにすることである。そこで、ゲートパターンを模した絶縁物のトレンチパターンの底での電子電流、そして電位のシフト量を In-situ 計測し、プラズマのパラメータとの相関を調べた。

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を述べた。第 2 章では、開発した、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミング技術について述べる。第 3 章では、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミング技術を使った、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタのゲートエッチングのアドバンスドプロセスコントロール (APC) 技術について述べ、実際のトランジスタ量産ラインでの加工精度の検証結果を示し、最後に APC のフィードバック制御の効果を考察する。第 4 章では、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマの In-situ 計測の方法と実験結果を述べ、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミングのメカニズムを考察する。第 5 章では、プラズマチャージングの In-situ 計測の方法と実験結果を述べ、プラズマチャージングのメカニズムを考察し、さらにプラズマチャージング回避のためのプラズマ制御の指針を示す。第 6 章は結論である。

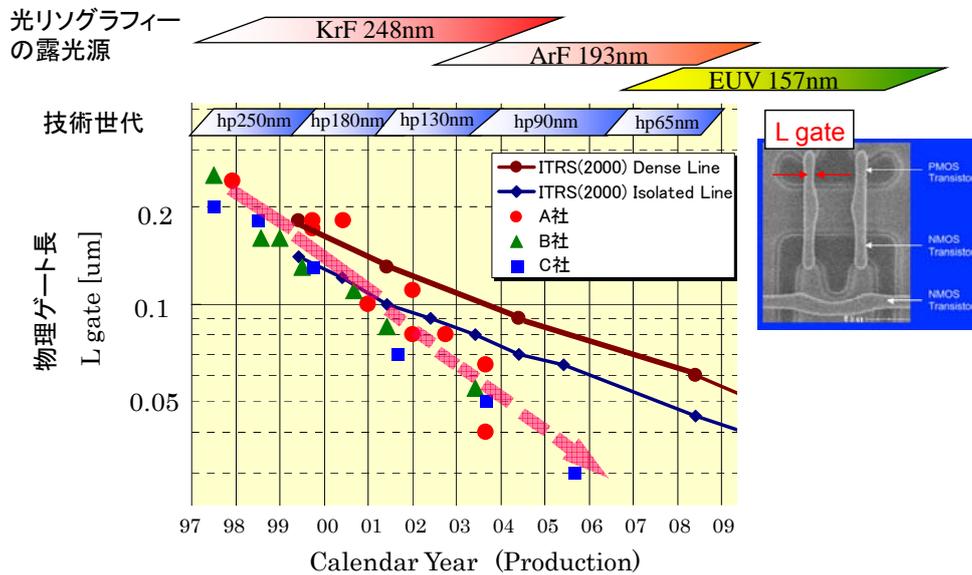


図 1-1: ITRS(2000)のトランジスタの物理ゲート長の予測トレンドグラフ。  
 実際に開発されたトランジスタの物理ゲート長もプロットした。右端の写真はトランジスタの CD-SEM 写真。"hp"は DRAM 配線寸法のハーフピッチの意味。

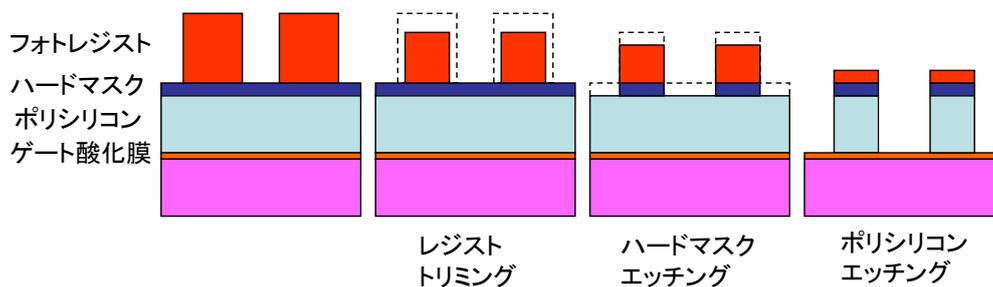


図 1-2: レジストトリミングとゲートエッチングの一例。

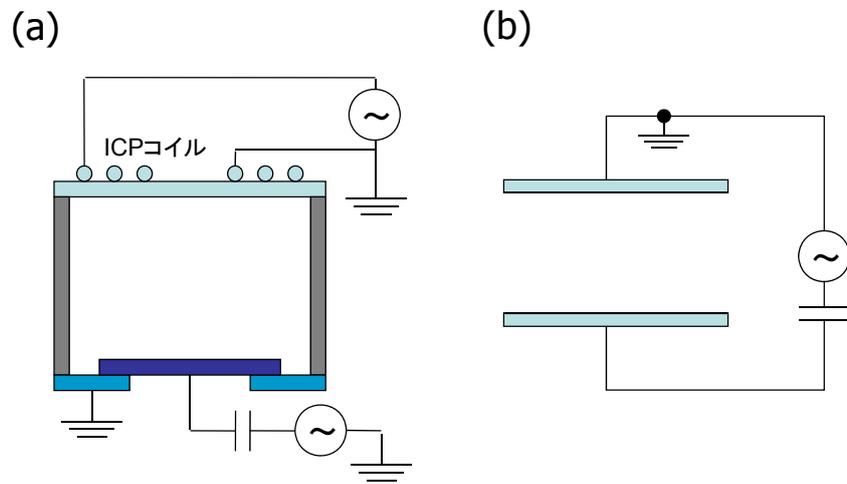


図 1-3: (a)誘導結合型プラズマ装置(ICP)と (b)平行平板型プラズマ装置(CCP)の概略図。

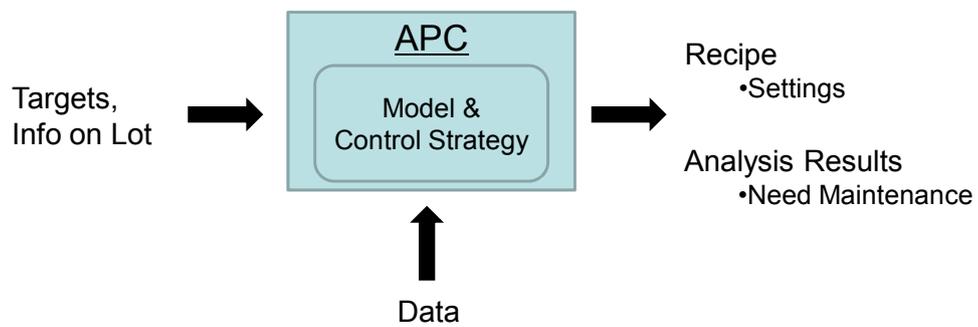


図 1-4: アドバンスドプロセスコントロールの概念図。

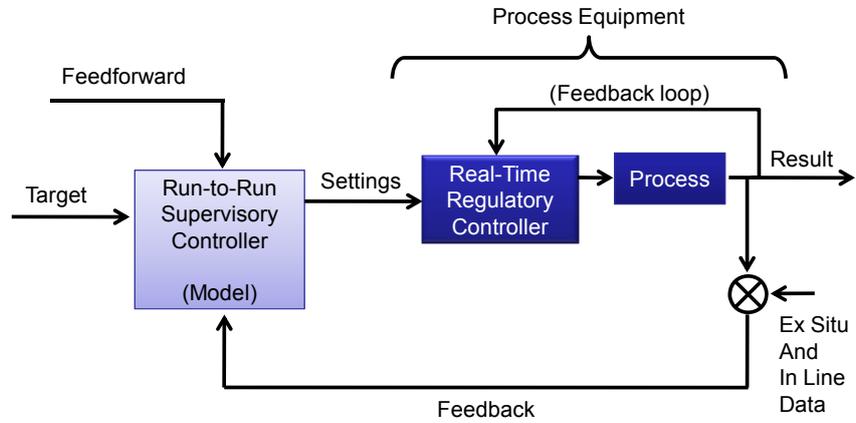


図 1-5: アドバンスドプロセスコントロールの制御ダイヤグラム。

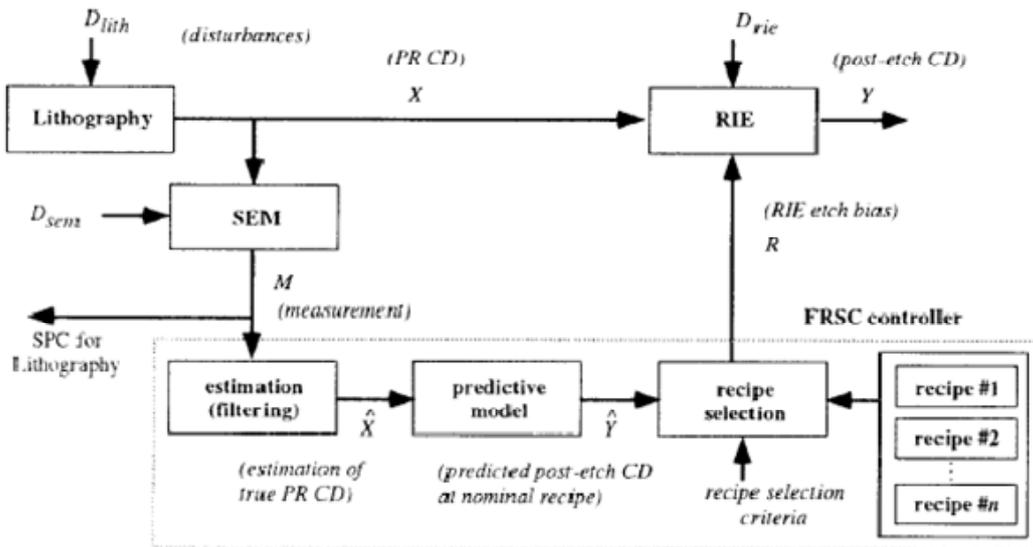


図 1-6: S. Ruegsegger のゲートエッチングのアドバンスドプロセスコントロールの制御ダイヤグラム<sup>2</sup>。

## 第2章

ゲート長 40nm トランジスタの

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマのレジストトリミング技術の開発

## 2 ゲート長 40nm トランジスタの SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマのレジストトリミング技術の開発

### 2. 1 序論

本研究のターゲットである、hp 90nm 技術世代のゲート長 40nm のトランジスタは、レジストトリミングでフォトリソのパターンを微細化してから、ゲートエッチングする必要がある。トランジスタ回路には、孤立配置されたゲートと密集配置されたゲートのパターンが存在する。たとえば図 2-1(a)は、ゲートエッチング終了直後のポリシリコンのゲートパターンである。そして図 2-1(b)は、レジストのゲートパターンである。孤立配置のパターンはパターンの両サイドにパターンが存在しないケースのことであり、逆に密集配置のパターンは注目するパターンの両サイドにパターンが存在するケースである。ゲートエッチングでは、パターンの疎密に依存せずに（孤立パターンと密集パターンとの間で物理ゲート長が異ならないように）ゲートをエッチング加工することが製造ラインでは要求される。

これまで露光光源が KrF エキシマーレーザーのレジストパターンでトリミングされた例が報告されているが（130nm→90nm）、そのレジストトリミングでは O<sub>2</sub> プラズマが用いられている<sup>8</sup>。O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミングでは、トリミング時間をパラメータとしてトリミング量を調整する。ところが O<sub>2</sub> プラズマでレジストパターンをトリミングすると、疎密パターン間でトリミングのレートが大きく異なるため、ポリシリコンゲートの疎密パターン間で大きな寸法差が生じるだけでなく、トリミング量に応じてトリミング時間を変えると疎密パターン間の寸法差が変化してしまう<sup>8</sup>。したがって疎密パターン間の寸法差をなくすためには、トリミング量を調整するための、トリミング時間とは別のパラメータが必要である。

ところで C. Monget らは、二層レジストのプラズマエッチングで上層レジストのパターンを下層のレジストに転写するとき、O<sub>2</sub> プラズマよりも SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの方がパターン側壁のエッチングレートがより抑えられ、エッチング転写精度がより向上することを報告している<sup>9</sup>。この報告をヒントにして、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比をパラメータにすればトリミング量を調整できる、すなわち SO<sub>2</sub> の割合を O<sub>2</sub> に対して高くすればパターン側壁のエッチングレートが抑えられてトリミング量が小さくなるだろうと考え、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミングを試みた。その結果、レジストのトリミング量が SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比で調整可能であることを明らかにし、さらに適切にトリミング時間を選択すれば疎密パターン間のトリミング量の差をほぼゼロに抑えられることができた<sup>10</sup>。

本章では、hp 90nm の技術世代のゲート長 40nm トランジスタのゲートエッチング用に開発した、トリミング量がパターン疎密に依存しない、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術について述べる。開発に使用した装置、開発したレジストトリミングのゲートエッチングプロセスのフロー、そして開発した SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術の詳細の順に述べる。最後に SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマでエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由を考察する。

## 2. 2 ゲートエッチングの装置とプロセスフロー

開発に使用した、ゲートエッチングのエッチング装置は、図 2-2 に示した、プラズマエッチング装置 Versys2300 (Lam 社製) である。プラズマ発生方式は、誘導結合型 (ICP : Inductively Coupled Plasma) であり、駆動周波数 2.7MHz の高周波電力が直径 330mm、3.5 ターンのヘリカルコイルから石英カバー (厚さ 60mm) を介してプラズマチャンバーに送られる。円筒形のプラズマチャンバーの直径は 500mm で高さは 230mm であり、300mm ウェハまでのエッチング処理ができる大きさとなっている。プラズマチャンバーの側壁はアルマイト処理 (Anodized Aluminum) が施されている。プラズマチャンバー下方には 8 インチのシリコンウェハを載置するバイアス電極がある。バイアス電極には駆動周波数 2MHz の高周波電力が印加される。エッチングガスは、プラズマチャンバーの石英カバー中央の直径 12.5mm の絶縁管から内部に導入され、バイアス電極の周囲の下方からガスの流れが中心軸対象となるように排気される。

ゲートエッチングのプロセスフローと各ステップにおけるゲートパターンの断面構造を、図 2-3 に示した。まずエッチング前の構造は、シリコン基板上にゲート窒化層 (1nm) とゲートを形成するポリシリコン層 (110nm) がある。さらにエッチングマスクとしてハードマスク層 (TEOS:30nm)、反射防止膜層 (BARC : Bottom Anti Reflection Coat、厚さ 50nm)、そして ArF レジストパターン (高さ : 300nm) がある。リソグラフィー直後のパターン幅が約 80 nm の ArF レジストでゲート長 40nm のポリシリコンゲートを作成する。そのため  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマでレジストパターンを約 40nm トリミングする。このとき反射防止膜も同時にエッチングされる。次いでトリミング後のレジストパターンをマスクとして、ハードマスク層を  $\text{CF}_4$  プラズマでエッチングする。ポリシリコン層のエッチングは、まずエッチングレートの高い  $\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{O}_2$  プラズマで下地のゲート酸化膜が見える手前までエッチングしてから (ポリシリコンメインエッチ : ME1 と呼ばれる)、下地のゲート酸化膜との選択比の高い  $\text{HBr}/\text{O}_2$  プラズマでゲート酸化膜が完全に露出するまでエッチングする (ポリシリコンメインエッチ : ME2 と呼ばれる) <sup>11</sup>。最後にレジスト残を  $\text{O}_2$  のアッシングで、ハードマスク残をフッ酸と硫酸水の洗浄工程で除去し、ポリシリコンのパターンが完成する。

## 2. 3 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマのレジストトリミング技術

本技術は、図 2-3 のプロセスフローのステップ(a) : レジストトリミングの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマで、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  の混合比によりレジストパターン幅のトリミング量を調整することで、ポリシリコンエッチング後の最終物理ゲート長を調整するものである。本節では、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合比とエッチングバイアス (Etching Bias) との関係を示していく。ここでエッチングバイアスとは、露光されたフォトリソレジストのゲート長とポリシリコンエッチング後の最終物理ゲート長との差である。このエッチングバイアスの値には図 2-3 の(a)のレジストトリミングのステップ以外のエッチング処理でのゲート長の変化も約 10nm 程度含まれているが<sup>12</sup>、そ

の値はレジストのトリミング量の大きさに比べれば小さい。

表 2-1(a)にレジストシュリンクの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマの条件を示した。表 2-1(b)は比較のための  $\text{O}_2$  プラズマの条件である ( $\text{SO}_2$  を添加しない場合)。 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマの場合は、 $\text{SO}_2$  と  $\text{O}_2$  の合計の流量を一定にして、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合比を振る。制御可能なエッチング時間、すなわち 10 ~20sec.程度に調整する目的で、He ガスで反応性ガスである  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合ガスを希釈している。 $\text{O}_2$  プラズマの場合も同様である。プラズマからのイオン衝撃によりレジストが変質するのを防ぐために、バイアス電圧は最大最小振幅電圧で 100V と低い値に設定されている。

レジストトリミングは反射防止膜層のエッチングと同時に行われる。レジストトリミングの処理時間は、反射防止膜層のエッチングの終点で決まる。反射防止膜層のエッチングの終点検出は、プラズマ中の一酸化炭素：CO 分子からの発光 (波長 519nm) を用いた EPD : エンドポイントディテクター (終点検出法) によりエッチング装置で自動的に決定される。図 2-4 に EPD の波形を示した。エッチング中の発光強度が安定したとき (図 2-4 ではこのときの強度を 1.0 で規格化した) の 90%をエンドポイントのしきい値とした。エンドポイントで決まるエッチング時間は、ウェハ面内ではほぼ反射防止膜がエッチングされた時間に相当する。以降、エッチング開始からエッチング終点が検出されるまでの時間をメインのエッチング時間と呼ぶ。メインのエッチング終了直後では、プラズマ密度がウェハ周辺部で若干低いために、ウェハ周辺部分で反射防止膜が少し残る。そのため、メインのエッチングに続いて、オーバーエッチングを行わなければならない。オーバーエッチング時間は、メインのエッチング時間に対して 20%程度である。

$\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合比とエッチングバイアスとの関係を導出するために用いた、ゲートエッチング用のモニタパターンの測長機 (CD-SEM、Hitachi S-9200)の写真を図 2-5 に示した (上から見た写真である)。パターンはエッチング前のフォトレジストである。(a)の 2 万倍表示の写真は孤立配置のパターンであり、(b)の 2 万倍表示の写真は(a)のパターンが横に 5 本並べられた密集配置のパターンである (ピッチは 260nm)。実際のゲートパターン(レジスト : パターン幅 80nm)に相当するのは、2 万倍の写真の点線で囲まれた二重露光部分である (それ以外の部分のパターン幅は約 130nm である)<sup>13</sup>。(a)と(b)の 20 万倍表示の写真はその二重露光部分であるが、この写真の倍率でパターン幅を測長した。密集配置のパターン(b)のパターン幅は、5 本のうち真ん中のパターンの幅を測長した。エッチング後のポリシリコンパターンの測長は、レジストパターンの場合と同様である。測長条件は、レジストパターンの場合、加速電圧が 300V、プローブ電流が 5pA である。そしてポリシリコンパターンの場合は、加速電圧が 800V、プローブ電流が 15pA である。図 2-6 は、ウェハ面内のチップレイアウト (左) とチップ内のブロックレイアウト (右上)、そしてブロック内の図 2-5 の測長パターンの位置を示した図 (右下) である。パターン幅を測長したチップは、十字状に並んだ図 2-6 (左) の 15 チップである。そのチップ内の真ん中のブロックの 4 隅の測長パターンエリアにある図 2-6 の測長パターンの幅を測長した。エッチング前後で異なる測長エ

リアのパターンを測長した。エッチング前後で測長エリアを分けた理由は、測長機の電子ビームによるレジストパターンのシュリンクの影響を極力避けるためである<sup>14</sup>。

図 2-7(a-d)には、四つの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  の混合比の水準で、オーバーエッチング時間によるエッチングバイアスのグラフを示した。横軸のオーバーエッチング時間はメインエッチング時間に対する割合(%)で示している。条件は、順に、(a)  $\text{SO}_2/\text{O}_2 : 6/24$  (sccm) [酸素分率: 80 %]、(b)  $\text{SO}_2/\text{O}_2 : 8/22$  (sccm) [酸素分率: 73 %]、(c)  $\text{SO}_2/\text{O}_2 : 10/20$  (sccm) [酸素分率: 67 %]、(d)  $\text{SO}_2/\text{O}_2 : 12/18$  (sccm) [酸素分率: 60 %]、である。

(a)の酸素分率 80%のグラフを見ると、オーバーエッチング開始時には孤立配置のパターンのエッチングバイアスは密集配置のパターンのよりも大きい。オーバーエッチングを行っていくと、疎密差、すなわち疎密パターン間のエッチングバイアスの差は次第に減少し、やがて一致し、その後反転している。(b)の酸素分率 73%のグラフでは、オーバーエッチング開始時のエッチングバイアスが両パターンともに(a)のグラフのよりも小さくなっているが、オーバーエッチングを続けていくと、(a)のグラフ同様、疎密差は次第に減少し、やがて一致し、その後反転する。以降、(c)の酸素分率 67%、(d)の酸素分率 60%のグラフも、酸素分率が小さくなるにつれて、オーバーエッチング開始時のエッチングバイアスが小さくなっていき、オーバーエッチング後の傾向は(a)、(b)と同様である。

ここで、(a)の酸素分率 80%の両パターン間のエッチングバイアスが一致するとき、エッチングバイアスの値は 48nm である。同様に(b)の酸素分率 73%のエッチングバイアスの値は 43nm であり、以降(c)の酸素分率 67%で 40nm、(d)の酸素分率 60%で 36nm である。このように孤立配置のパターンと密集配置のパターンのエッチングバイアスが同一値になるようにオーバーエッチング時間を選択しながら、酸素分率を変えていけば孤立配置のパターンと密集配置のパターンの幅の比が変化せず、しかもパラメータを振っても両者の比は変化しないことがわかる。

図 2-8 は、上述の条件に従って酸素分率を変化させ、両パターン間のエッチングバイアスと酸素分率の関係をフィッティングする曲線で表示させたグラフである。孤立配置のパターンと密集配置のパターンのエッチングバイアスが同一値になるときのオーバーエッチング時間が図 2-8(a-d)では 40% ~ 50%の間であったので、オーバーエッチング時間を 44%固定とした。グラフの形は直線に近く、酸素分率を 54% ~ 74%の範囲で振れば、エッチングバイアスを 31nm ~ 43nm、レンジで 12nm の範囲で調整できる。しかも疎密差の変動のレンジは 2nm ( $\pm 1$ nm) 以下である。したがって、この関係を使えばパターン疎密に依存せずにトリミング量を調整することが可能である。

## 2. 4 SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマでエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマでエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由は、次の二つの理由が組み合わさったためである。

第一は、メインエッチングで、SO<sub>2</sub>をO<sub>2</sub>ガスに添加することにより、孤立配置のパターンのトリミング量が大きく改善され、孤立配置のパターンのトリミング量の方が密集配置のパターンのトリミング量よりも若干大きな値になったからである。これについては、図 2-9 に O<sub>2</sub>プラズマのエッチングバイアスと SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマを並べて示した。図 2-9 では密集配置のパターンのエッチングバイアスがほぼ同じ条件の結果を比較している。O<sub>2</sub>プラズマのメインエッチングでは孤立配置のパターン幅がトリミングされにくい。

第二は、オーバーエッチングでは、密集配置のパターンの方が孤立配置のパターンよりもトリミングレートが大きいため、オーバーエッチング時間を調整すればメインエッチングで生じたトリミング量の差を解消できるからである。これについては、前節で図 2-7(a-d)のグラフを使って説明したとおりである。

O<sub>2</sub>プラズマのメインエッチングで孤立配置のパターン幅がトリミングされにくい理由を考察する。図 2-10 には O<sub>2</sub>プラズマのメインエッチングでのレジストトリミング量の時間変化を示した。横軸はメインエッチング完了時を 100 (%)としている。エッチング時間 0 ~ 50 (%)の間で、孤立配置のパターンのトリミング量が減少し、パターン幅が増加していることがわかる。図 2-11 に示した反射防止膜の残膜厚のエッチング時間変化のグラフから、エッチング時間 0 ~ 50 (%)の間は、ちょうど反射防止膜がエッチングされている期間に相当する。一方、同じ期間の密集配置のパターンのトリミング量は減少せず、ほぼ一定である。このメインエッチングでのパターン疎密間のトリミング量の違いから、O<sub>2</sub>プラズマでは、反射防止膜からのエッチング反応生成物がパターンの側壁に堆積してエッチングを阻害した可能性が高い。

さらに図 2-12 には O<sub>2</sub>プラズマのメインエッチングでのレジストパターンの輪郭形状の時間変化を示したが、トリミングが進むにつれて、パターンの頭から根元に下がるに従って幅がより細っていくことがわかる。図 2-11 からレジストパターン高さはエッチング時間であまり変化していないので、レジストと反射防止膜のエッチングレートはほぼ同じである。反射防止膜とレジストのエッチングレートがほぼ同じならば、パターンの初期の輪郭がそのまま維持されるはずである。しかし実際そうはならないということは、図 2-12 の輪郭形状は、パターン周辺部分の反射防止膜からのエッチング反応生成物が直接パターンの側壁に飛んできて堆積した結果ではないかと考えられる。

以上の考察から SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマでは、メインのエッチングのとき、孤立配置のパターンの側壁で、エッチング反応生成物の堆積が抑制されて、あるいはレジストパターン周囲の反射防止膜から堆積しにくいエッチング反応生成物が生成されて、エッチング反応が促進したと考えられる。一方、オーバーエッチングのとき SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマで密集配置のパターンの

方が孤立配置のパターンよりもトリミングレートが大きくなる理由については、想像ではあるが、孤立配置のパターン周辺のハードマスク（材質は SiO<sub>2</sub>）の表面でできた反応生成物がイオンスパッタリングされて孤立配置のパターン側壁に付着し、エッチング反応をが阻害されたのではないかと推測される（オーバーエッチングのときは下地のハードマスクが露出した状態である）。

## 2. 5 まとめ

hp 90nm 技術の物理ゲート長 40nm のトランジスタのゲートエッチング用に、トリミング量がパターン疎密に依存しない、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術を開発した。

レジストトリミングの装置は商用の ICP プラズマエッチング装置であり、ArF レジストと反射防止膜の 2 層構造のレジストのゲートパターンの幅 80nm を、反射防止膜をエッチングしながら 40nm まで縮小する。エッチングのパラメータは SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比である。

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比とエッチングバイアスとの関係のグラフは、形が直線に近く、酸素分率を 54% ~ 74% の範囲で振れば、エッチングバイアスを 31nm ~ 43nm、レンジで 12nm の範囲で調整することができる。しかも孤立配置のパターンと密集配置のパターンのエッチングバイアスの疎密差の変動のレンジは 2nm (±1nm) 以下となり、パターン疎密に依存せずにトリミング量を調整することが可能である。

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由は、メインエッチングで、SO<sub>2</sub> を O<sub>2</sub> ガスに添加することにより、孤立配置のパターンのトリミング量が大きく改善され、孤立配置のパターンのトリミング量の方が密集配置のパターンのトリミング量よりも若干大きな値になったからである。さらには、オーバーエッチングで、密集配置のパターンの方が孤立配置のパターンよりもトリミングレートが大きいため、オーバーエッチング時間を調整すればメインエッチングで生じたトリミング量の差を解消できたからである。

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマでは、メインのエッチングのとき、孤立配置のパターンの側壁で、エッチング反応生成物の堆積が抑制されて、あるいはレジストパターン周囲の反射防止膜から堆積しにくいエッチング反応生成物が生成されて、エッチング反応が促進したと考えられる。そして、オーバーエッチングのとき、孤立配置のパターン周辺のハードマスクの表面でできた反応生成物がイオンスパッタリングされて孤立配置のパターン側壁に付着し、孤立配置のパターン側壁でエッチング反応が阻害されたのではないかと推測される。

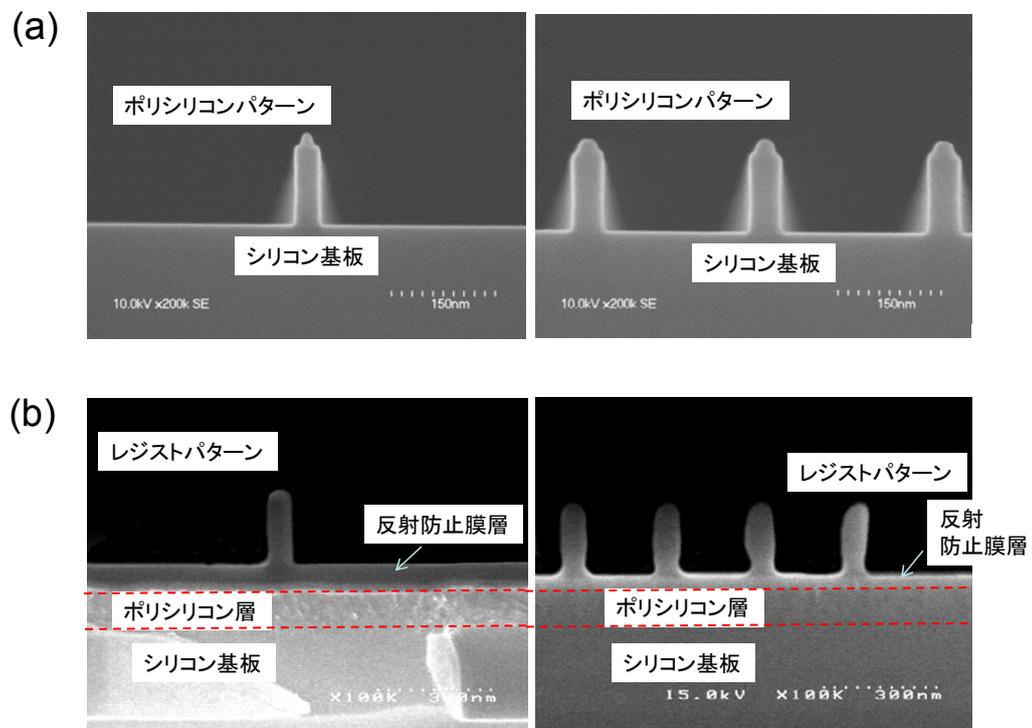


図 2-1: 孤立配置と密集配置のゲートパターンの断面 SEM 写真。

(a) ポリシリコンのパターン、(b)レジストパターン。但し、(a)と(b)は別パターン。

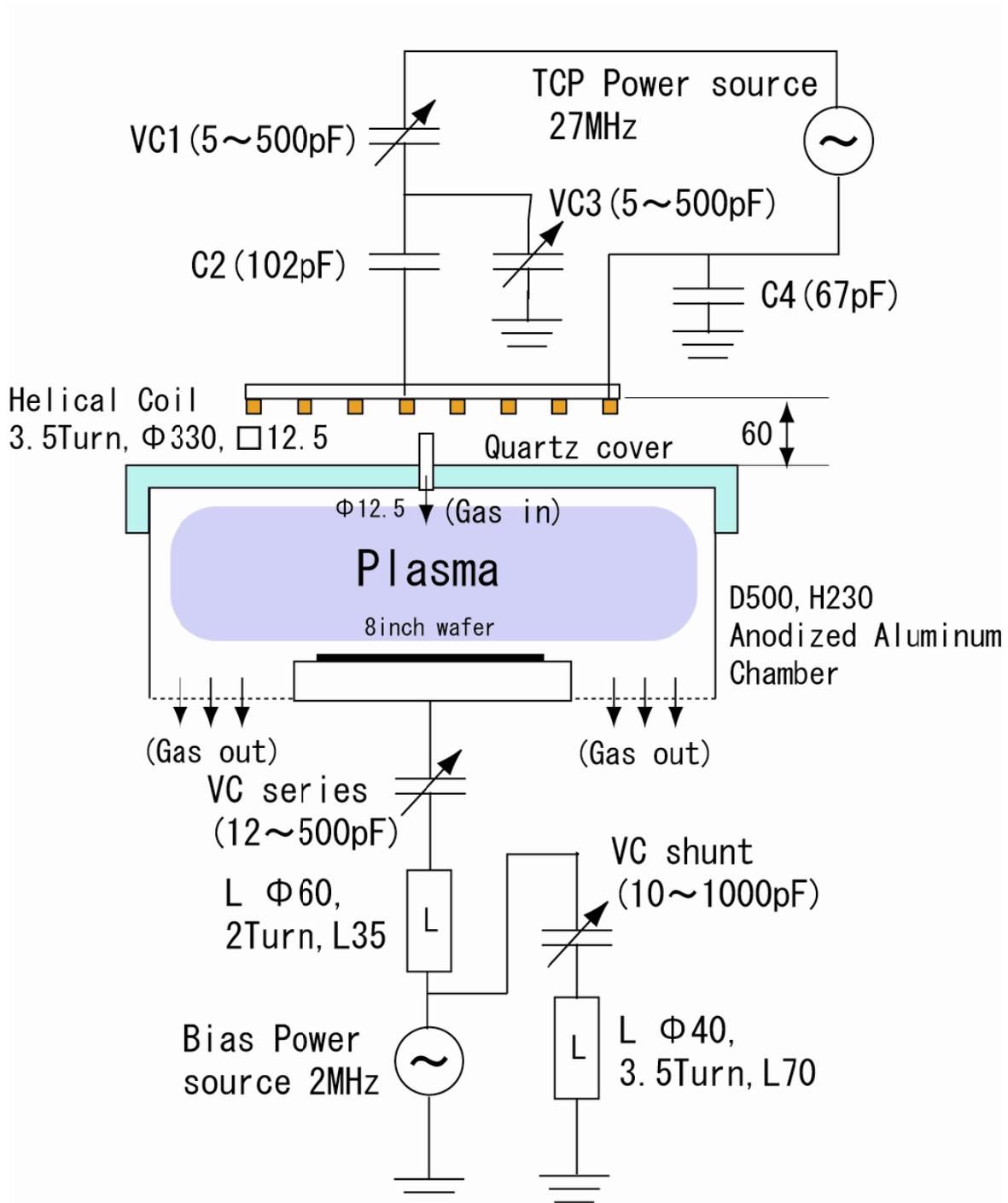


図 2-2: ゲートエッチング装置 (Versys 2300, Lam 社製) の概略図。

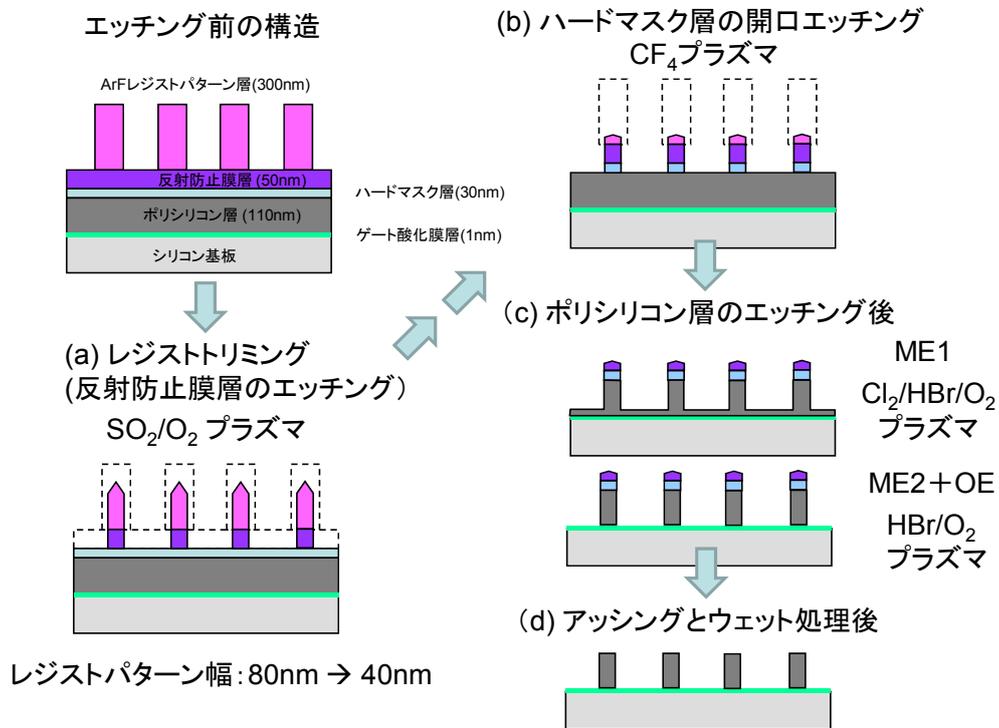


図 2-3: ゲートエッチングプロセスのフロー。

(a) SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマ(He希釈)

ステップ名	圧力(mTorr)	TCPパワー(W)	BIASパワー(W) [Vpp (V)]	ガス種	ガス流量 (sccm)	終点検出
BARC層 メインエッチング	5	300	20 [100]	He/SO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	He: 60 (SO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ): 30	EPD 約20sec
BARC層 オーバーエッチ ング	5	300	20 [100]	He/SO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	同上	メイン エッチ時 間の33%

(b) O<sub>2</sub>プラズマ(He希釈)

ステップ名	圧力 (mTorr)	TCPパワー(W)	BIASパワー(W) [Vpp (V)]	ガス種	ガス流量 (sccm)	終点検出
BARC層 メインエッチング	5	200	20 [100]	He/O <sub>2</sub>	He: 30 O <sub>2</sub> : 1	EPD 90sec
BARC層 オーバーエッチ ング	5	200	50 [220]	He/O <sub>2</sub>	同上	10sec 固定

表 2-1: レジストトリミング (反射防止膜層のエッチング) の条件。

(a)SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマの条件。(b)比較のための O<sub>2</sub> プラズマの条件。

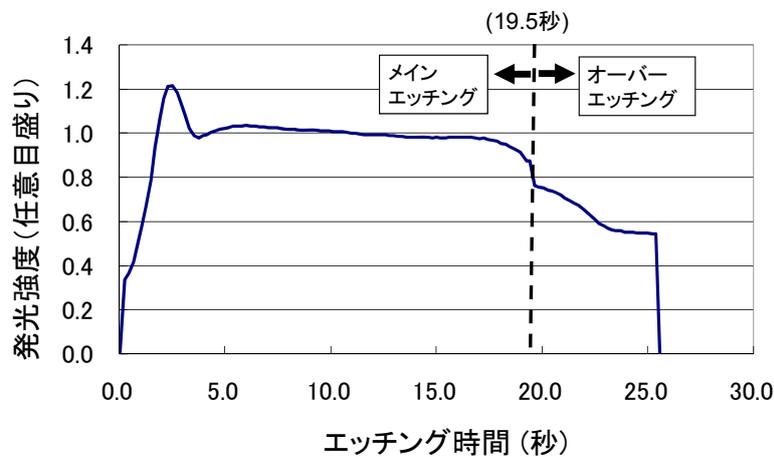


図 2-4:レジストトリミング(反射防止膜層のエッチング)で使われている EPD (End Point Detector : 終点検出器) の波形。  
 光の波長は一酸化炭素 : CO の 519 (nm)である。エッチング条件は  $SO_2/O_2 = 6/24$  (sccm) 。その他の条件は表 2-1(a)に記載。

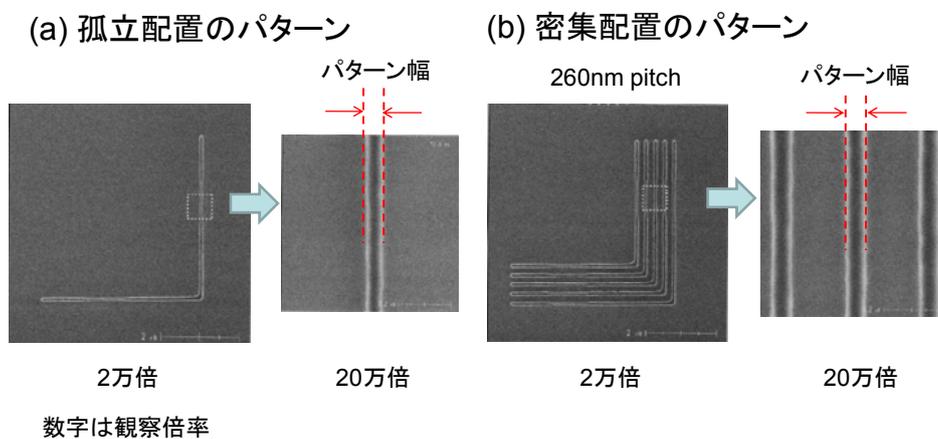


図 2-5: モニタ用のレジストパターン of CD-SEM(Hitachi S-9200)写真。  
 (a) 孤立配置のレジストパターン。(b) 密集配置のレジストパターン。20 万倍の SEM 写真は 2 万倍の SEM 写真の点線で囲んだ部分を拡大した写真であり、この部分が実験のパターン寸法が約 80 (nm) のモニタ領域である。

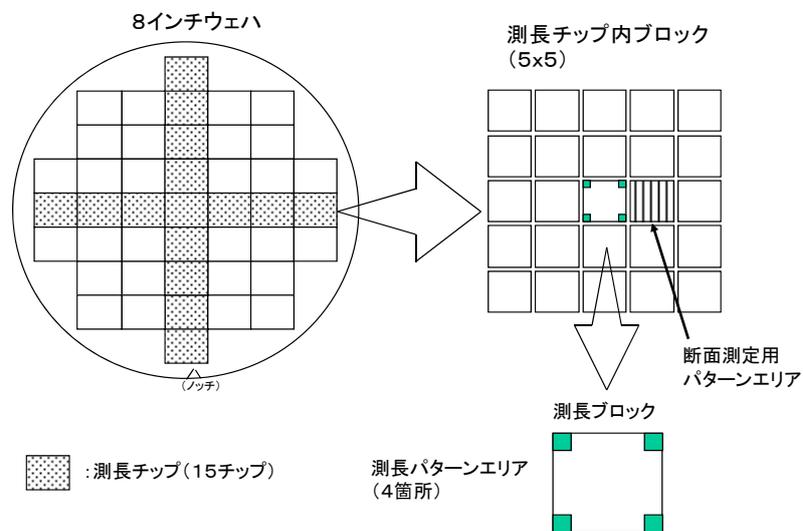


図 2-6: ウェハ面内のチップレイアウト (左) とチップ内のブロックレイアウト (右上)、ブロック内の測長パターンエリア (右下)。測長パターンエリアには図 2-5 のモニタパターンが配置されている。

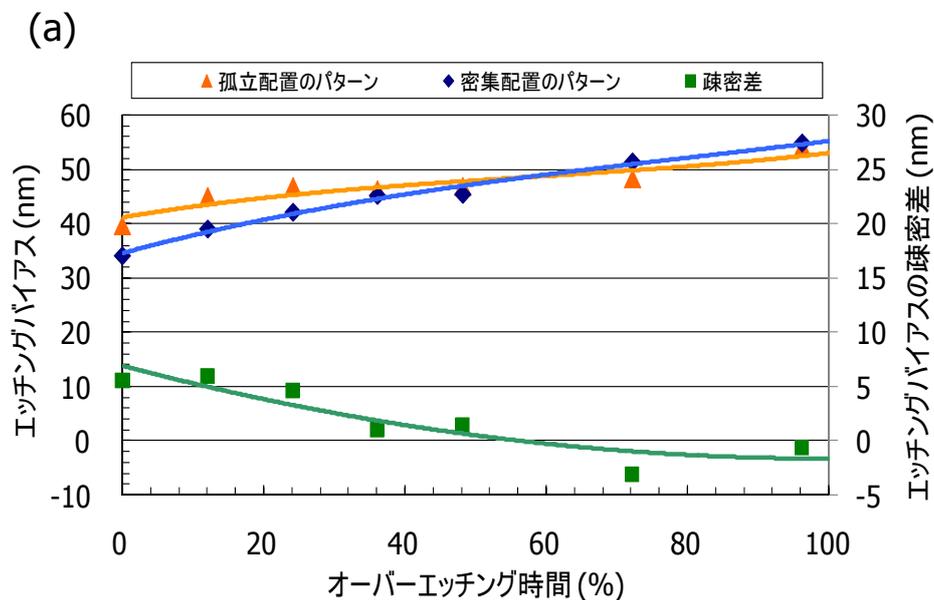


図 2-7 (a):  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマのオーバーエッチング時間によるエッチングバイアスのグラフ。条件は、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$ : 6/24 (scm)、酸素分率: 80 (%)。その他の条件は表 2-1(a)に記載。エッチングバイアスの疎密差は、孤立配置のパターンのエッチングバイアスから密集配置のパターンのエッチングバイアスを引いた値。

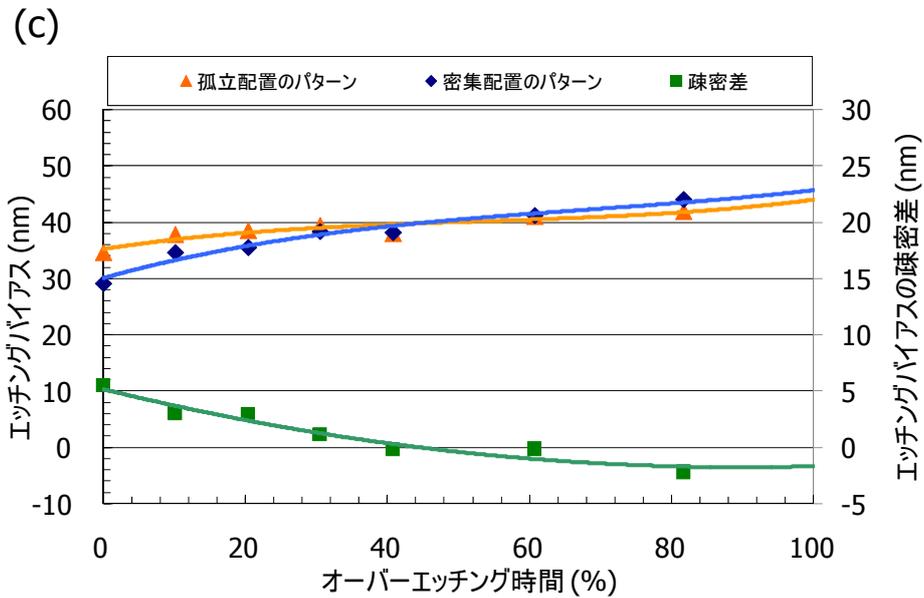
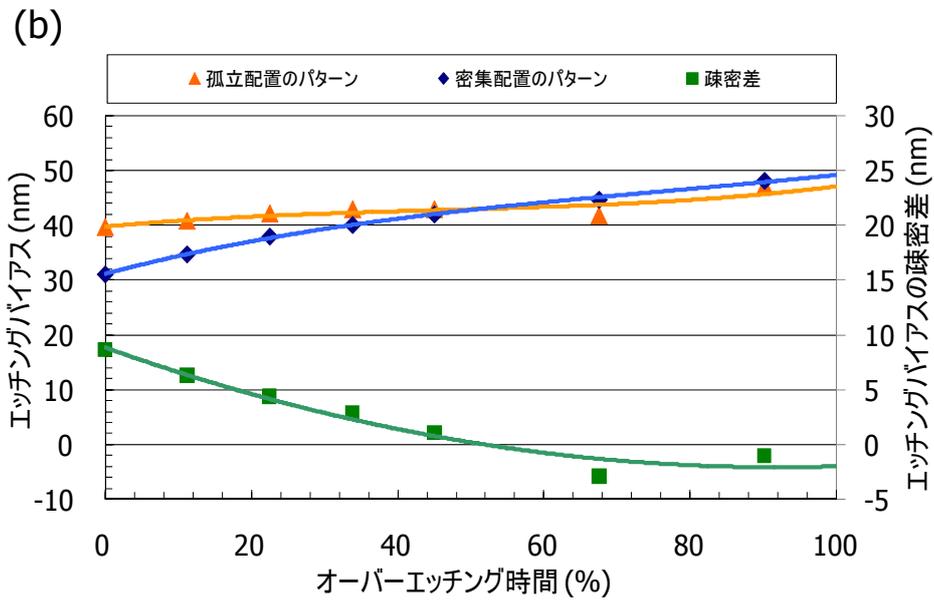


図 2-7 (b-c):  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマのオーバーエッチング時間によるエッチングバイアスのグラフ。

条件は、(b)  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  : 8/22 (sccm)、酸素分率 : 73 (%)、(c)  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  : 10/20 (sccm)、酸素分率 : 67 (%)。その他の条件は表 2-1(a) に記載。エッチングバイアスの疎密差は、孤立配置のパターンのエッチングバイアスから密集配置のパターンのエッチングバイアスを引いた値。

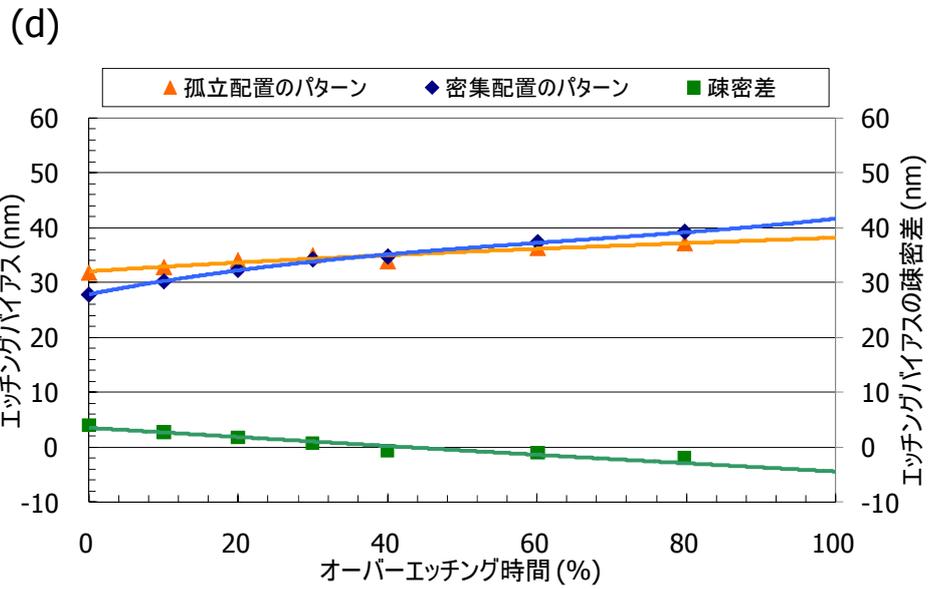


図 2-7 (d):  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマのオーバーエッチング時間によるエッチングバイアスのグラフ。条件は、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  : 12/18 (sccm)、酸素分率 : 60 (%)。その他の条件は表 2-1(a)に記載。エッチングバイアスの疎密差は、孤立配置のパターンのエッチングバイアスから密集配置のパターンのエッチングバイアスを引いた値。

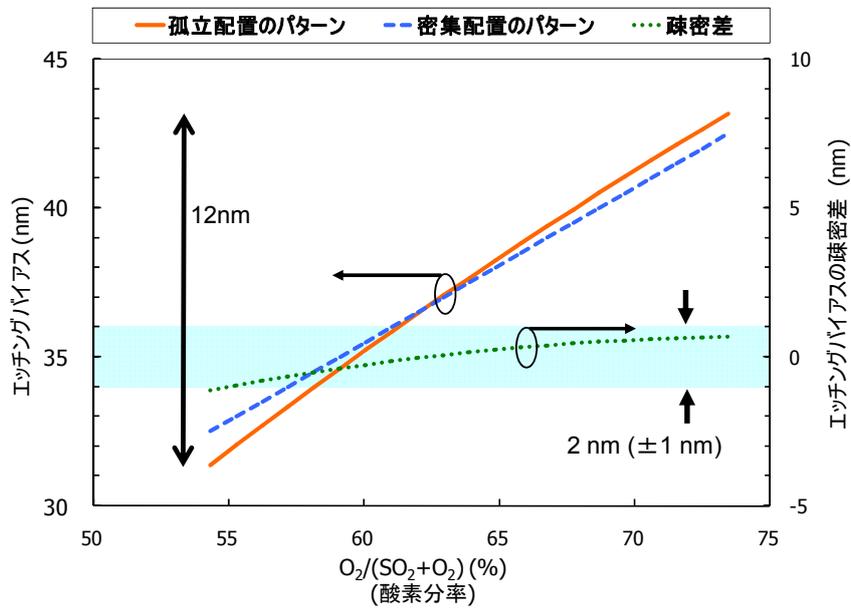


図 2-8:  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマの酸素分率によるエッチングバイアスのグラフ。オーバーエッチング時間は 44 (%) (メインエッチング時間に対する割合)。その他の条件は表 2-1(a)に記載。

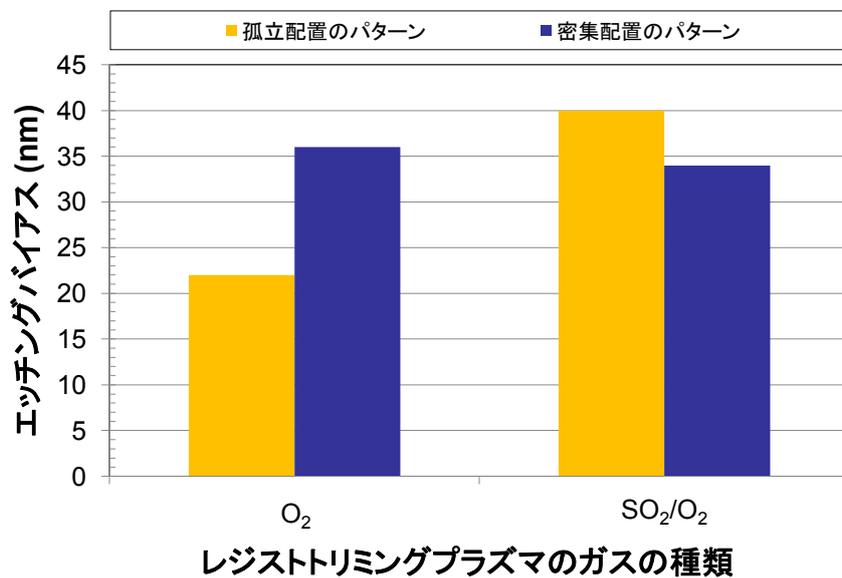


図 2-9: メインエッチング完了直後のエッチングバイアス。  
 個々のプラズマ条件は表 2-1 に記載。但し、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマの混合比は、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> : 6/24 (sccm)。

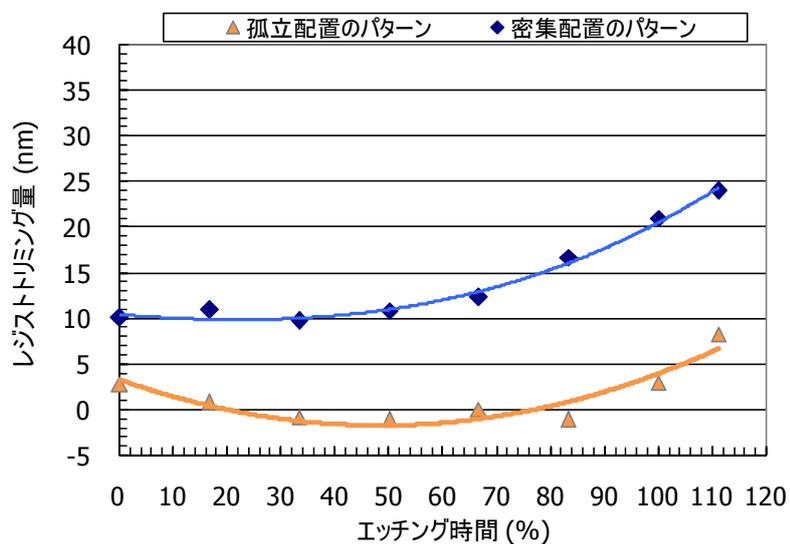


図 2-10: O<sub>2</sub> プラズマのメインエッチングでのレジストトリミング量の時間変化。  
 条件は表 2-1(b)に記載。レジストトリミング量はエッチング前後のレジストパターンの寸法差である。

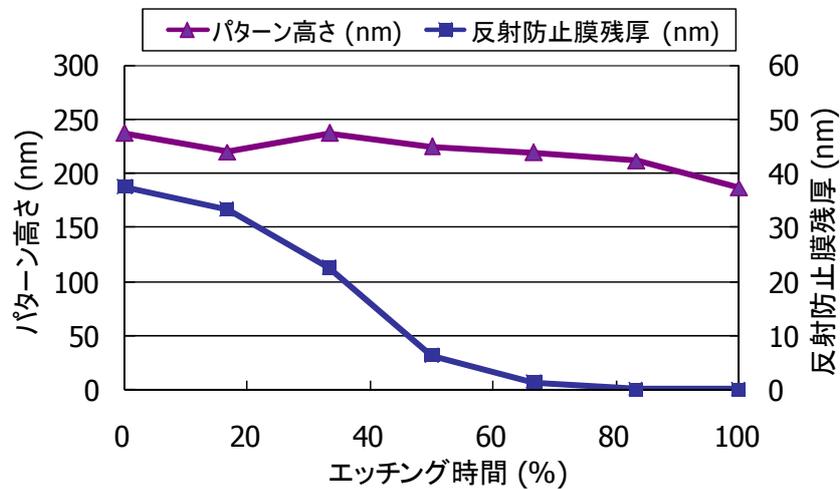


図 2-11: O<sub>2</sub> プラズマのメインエッチングでのレジストパターンの高さや反射防止膜の残膜厚の時間変化。

各長さは断面 SEM(Hitachi S-4500、加速電圧 15kV)の断面 SEM 写真から測定。条件は表 2-1(b)に記載。

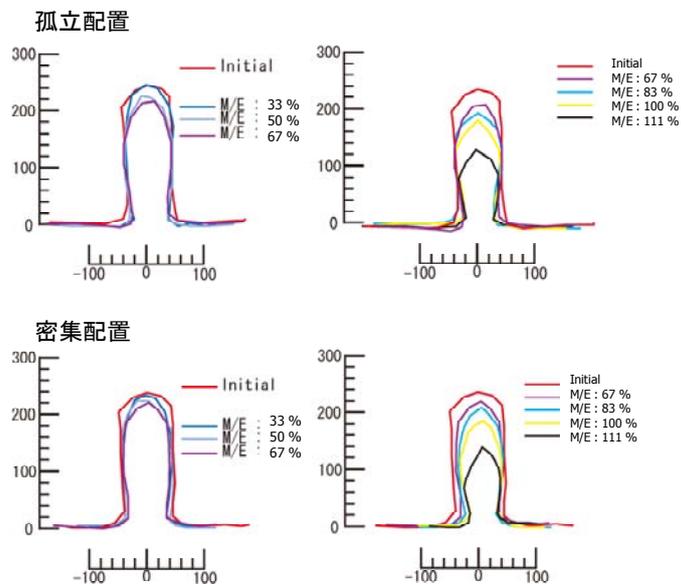


図 2-12: O<sub>2</sub> プラズマのメインエッチングでのレジストパターンの輪郭形状の時間変化。

個々の輪郭は断面 SEM (Hitachi S-4500、加速電圧 15kV) の写真から抽出した。条件は表 2-1(b)に記載。

## 第3章

### ゲート長 40nm トランジスタの アドバンスドプロセスコントロールによる ゲート長の加工精度の向上

### 3 ゲート長 40nm トランジスタのアドバンスドプロセスコントロールによるゲート長の加工精度の向上

#### 3. 1 序論

トランジスタの物理ゲート長を短くするとトランジスタの駆動電流の増大により速度性能は向上するが、物理ゲート長が短すぎるとリーク電流の増大により待機時消費電力が増大し、歩留まりが低下する。逆に、トランジスタの物理ゲート長を長くすればリーク電流の減少により待機時消費電力が減少するが、物理ゲート長が長すぎると駆動電流の減少により速度性能が低下し、歩留まりが低下する。したがって CMOS ロジック LSI の量産ラインでは、CMOS ロジック LSI 回路の中の全てのトランジスタの物理ゲート長は、ある一定の範囲内に収まるようにゲートエッチングで加工されなければならない(図 3-1)。

しかし、本研究のターゲットである、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm のトランジスタのゲートエッチング加工には次の二つの課題がある。第一の課題は、物理ゲート長 50nm 以下のトランジスタの量産ラインで、物理ゲート長のロット間のランダムなばらつきが解決できていないことである。ロットとは量産ラインでのウェハ処理の単位であり、1 ロットには 25 枚のウェハが含まれる。物理ゲート長のロット間のランダムなばらつきには、リソグラフィー起因のばらつきとエッチング起因のばらつきの二つが含まれる。リソグラフィー起因のばらつきとしては、露光エネルギーやフォーカス(露光結像面の焦点)のエラー、レジスト塗布におけるレジスト膜厚のばらつき等が挙げられる。特に、近年の物理ゲート長 100nm 以下のトランジスタ製造で用いられる、高解像力を必要とされるリソグラフィーでは、焦点深度(フォーカスマージン)が解像度の 2 乗に反比例するため、焦点深度が大変狭い(図 3-2)。そのためフォーカスエラーによるレジストパターン幅のばらつきの寄与が最も大きいと考えられる。一方、エッチング起因のばらつきとしては、エッチング処理を繰り返していくうちにエッチング装置の壁に堆積するエッチング反応生成物の影響で起こる、エッチングレートの長期変動<sup>15, 16</sup>によるポリシリコンパターン幅のばらつきが考えられる。

第二に、レジストトリミングに起因する疎密パターン間のトリミング量の差によるシステムティックな物理ゲート長のばらつきが解決できていないことである。トランジスタは、シリコン基板に小さく部分的に作られたソースとドレイン領域の上に、ポリシリコンのゲートを搭載した構造をしており、多くの場合、トランジスタ同士がトランジスタの大きさより十分大きな間隔で孤立して配置される。そして、複数のトランジスタの間でソース・ドレイン領域を共有できる場合に限りトランジスタが密集して配置される。O<sub>2</sub> プラズマでレジストトリミングを行った場合、孤立して配置されたゲートパターンと密集して配置されたゲートパターン(両サイドがパターンに囲まれているパターン)との間で、エッチングのマイクロローディングと考えられる効果によりトリミング量にバイアス(差)が生じてしまう。さらに APC でトリミング時間を振ってレジストパターンの寸法を調整しようとする疎密パターン間のエッチングバイアスが変化してしまう。

これまで上記の二つの課題を同時に解決できるレジストトリミングのアドバンスドプロセスコントロールによる加工精度の向上は実現されてなかった。そこで、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm のトランジスタのゲートエッチング加工での、パターン疎密に依存しない  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマのレジストトリミングを使った、アドバンスドプロセスコントロール (APC) 技術を開発した。この APC には、第 2 章の  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合比とエッチングバイアスとの関係式をモデルとして組み込んだ。

本章では、 $\text{SO}_2 / \text{O}_2$  プラズマのレジストトリミング技術を使った、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタのゲートエッチングのアドバンスドプロセスコントロール (APC) 技術について述べ、実際のトランジスタ量産ラインでの加工精度の検証結果を示し、最後に APC のフィードバック制御の効果を考察する。

### 3. 2 ゲートエッチングプロセスの APC システム

本研究の APC の目的は、ロットの物理ゲート長の平均値が、ねらい値に追従するように制御することである。1 ロットは、25 枚のウェハから構成される、量産ラインの全ての工程はロット単位で処理が行われ、1 ロットは 25 枚のウェハから成る。図 3-3 には 3 ロット分の物理ゲート長がロットでばらついている様子を模式的に示した。ロットのばらつきの分布はウェハ 1 枚 1 枚のばらつき分布が積算されたものである。ロット A はロットの平均値がねらい値とほぼ一致しているが、ロット B とロット C はロットの平均値がねらい値から大きく外れており、3 ロット合計のばらつきはロット A の 1 ロット分のばらつきよりもかなり大きくなる。APC のシステムはロット B とロット C のロット平均値をねらい値に近づけ、その結果 3 ロットの合計のばらつきを減少させる。

図 3-4 にゲートエッチングプロセスのプロセスの流れと APC システムのデータの流れを簡単に示した。まずリソグラフィー後のレジストパターン幅が測長され、モデルベースのプロセスコントローラ (MBPC: Model-based Process Controller) にフィードフォワードされる。モデルベースコントローラは、エッチング後のポリシリコンの最終物理ゲート長のロット平均値がねらい値になるように、最適なエッチングパラメータの値を決定する。その最適なエッチングパラメータの値を使いエッチング装置でポリシリコンパターンが形成される。モデルベースプロセスコントローラにインストールされている制御モデルは、第 2 章の図 2-8 で示した、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  の混合比 (酸素分率) とエッチングバイアスとの関係式である。この関係式はパターン疎密に依存せずにトランジスタの最終物理ゲート長を調整できる。ここでエッチングバイアスは、リソグラフィー後のレジストパターン幅からポリシリコンの最終物理ゲート長を引いた値である。エッチング終了後、ポリシリコンの最終物理ゲート長を測長する。その測長値がモデルベースコントローラにフィードバックされ、次に処理されるロットのために制御モデルが更新される。

リソグラフィー後のレジストパターン幅が太いときに、そのままエッチングすればポリシリコンパターン幅は太くなり、逆に、レジストパターン幅が細いときときに、そのままエッチ

チングすればポリシリコンパターン幅は細くなる。したがってレジストパターン幅が太ければエッチングバイアスの大きい条件でエッチングする、あるいはレジストパターン幅が細ければエッチングバイアスの小さい条件でエッチングすれば、ポリシリコンの最終物理ゲート長をねらい値に近づけることができる。図 3-5 には、リソグラフィ後のレジストパターン幅のロット平均値がコントローラにフィードフォワードされてから最適なエッチングレシピが求められるまでのデータ処理の流れを模式的に示した。ロットのレジストパターン幅の平均値からポリシリコンの最終物理ゲート長のねらい値を引いて、ねらい値に近い最終物理ゲート長を達成するために必要なエッチングバイアスの値:Yが見積もられる。制御モデルのエッチングバイアスの調整範囲は幅 q で分割され、離散的な値  $y_1, y_2, \dots, y_n$  とした。エッチングバイアスの離散値  $y_n$  には、上記のエッチングバイアス Y とエッチングパラメータ X の関係式から求まる、エッチングパラメータの離散値  $x_n$  が対応付けた。エッチングバイアスの見積もり値 Y に最も近いエッチングバイアスの離散値  $y_n$  に対応するエッチングパラメータの離散値  $x_n$  が最適なエッチングパラメータ X' として選択される。

フィードフォワードされるリソグラフィ後のレジストパターン幅の平均値、並びにエッチングバイアスの見積もり値 Y は、ばらつき  $\sigma_M$  のレジストパターン幅の平均誤差(Mean Error)を持っている。ばらつき  $\sigma_M$  の値は、リソグラフィ後のレジストパターン幅のばらつきを  $\sigma^2$  とすると、次の式(3-1)で見積もられる。

$$\sigma_M^2 = \frac{\sigma^2}{N} \quad (3-1)$$

ここで N は平均値を計算するときのサンプル数である。制御モデルのエッチングバイアスの分割幅 q はポリシリコンの最終物理ゲート長をどのくらいの精度で制御するかにより決まるが、その値は平均誤差のばらつき  $\sigma_M^2$  より十分に小さくなければならない。そこで、ある値がどのような数値の範囲にあるかを確率的に示す信頼区間(Confidence interval)を使って、 $\chi \sigma_M < q / 2$  を満足するようにサンプル数 N を決めた。ここで  $\chi$  は信頼区間の係数であり、その確率が 95% ならば 1.96 となる。

制御モデルのエッチングバイアス Y は離散的な値  $y_1, y_2, \dots, y_n$  をとるので、選択されたエッチングバイアスの離散値  $y_n$  には丸め誤差(Rounding error)を伴う。丸め誤差のばらつき  $\sigma_R^2$  は次の式(3-2)で定量的に見積もられる。

$$\sigma_R^2 = \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} \frac{\chi}{q} d\chi = \frac{q^2}{12} \quad (3-2)$$

式(3-2)では、分母に 12 が来るので、分割幅 q を小さくとれば、丸め誤差の値は問題のないレベルまで小さくなる。

エッチング装置の内壁にはエッチング反応生成物が蓄積されるので、その影響でエッチングレートが変化する。処理されるロットが増えていけば、その影響は大きくなっていく。その結果として制御モデルのエッチング関係式がロット処理毎に変化していくと考えられるので、APC システムでは制御モデルの関係式を常に最新の式に更新しなければならない。

しかしロットが処理されるたびに、エッチングの関係式をパラメータ振りによる実験で導出するのは運用上困難である。そこで、1) 制御モデルは一次式で表現でき、2) その制御モデルの一次式の傾きは変化しないという前提条件のもとで、その切片のみをフィードバックした過去ロットのエッチングパラメータ、エッチングバイアスの値を使って更新するとした。図 3-6 には制御モデルの関係式の更新方法を模式的に示した。フィードバックされた、過去ロットのエッチングバイアス  $Y_{act}$  (実測値) とエッチングパラメータ  $X_{set}$  (設定値) がエッチング (トリミング) の関係式  $Y=aX + b + \Delta b$  ( $a$ : 傾き、 $b$ : 切片、 $\Delta b$ : 切片のシフト量) に代入され、切片のシフト量  $\Delta b$  を求める。次の新たなロットが APC システムに入ってきたときに、最適なエッチングバイアスの見積もり値  $Y$  から切片のシフト量  $\Delta b$  の値を引いた値を使って、最適なエッチングバイアス  $X'$  の値を選択する。これは、エッチングバイアスが切片のシフト量  $\Delta b$  だけ大きくなっているため、ねらい値を達成するために必要なエッチングバイアスは  $Y$  よりも  $\Delta b$  だけ小さい値で十分であるという意味である。

上記のフィードバックで用いられている予測法 (Prediction Method) は持続予測法 (Persistence) と呼ばれる。持続予測法とは、予測処理時のエッチング結果が予測先時間でも持続するという仮定のもとに、現在のエッチング結果を将来のエッチング結果として予測する方法であり、交通渋滞や、気象、そして経済学の需要予測で使われている。フィードバックで発生する誤差は主に予測誤差である。この予測誤差には、計算の過程で平均誤差、装置のパラメータの設定誤差等を含む。予測誤差  $\Delta P$  は実際のロットの切片のシフト量  $\Delta b_{act}$  から、予測処理時の切片のシフト量  $\Delta b_{pre}$  の値を引いた値  $\Delta b_{pre} - \Delta b_{act}$  である。過去に処理された複数のロットの予測誤差の統計的なばらつきからフィードバックの精度 (誤差) を定量的に評価できる。数式で表現するのであれば、予測誤差のばらつき  $\sigma_p^2$  は

$$\sigma_p^2 = \text{Var}[\Delta P] = \text{Var}[\Delta b_{pre} - \Delta b_{act}] \quad (3-3)$$

ここで演算子  $\text{Var}[x]$  は  $x$  のばらつきを表す。

### 3. 3 hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタ量産ラインでの検証実験

#### 3. 3. 1 検証実験の方法

hp 90nm 技術世代の ITRS のリソグラフィとプラズマエッチングを含めた物理ゲート長のランダムなばらつきの許容値は物理ゲート長の 10% 以内 ( $3\sigma$ ) である<sup>17</sup>。そこで物理ゲート長 40nm のトランジスタのゲートエッチング加工の物理ゲート長のばらつき (精密度: Precision) の許容値は 4nm ( $3\sigma$ ) を目標とした。そして物理ゲート長の加工の正確度 (あるいは再現性、的中率: Accuracy) についてはメーカーで自由に設定できる値だが、ここではナノメートルオーダーの制御を目指すという意味で、その許容値を  $\pm 1\text{nm}$  とし、その許容値内のロットの割合は 90% 以上を目標とした。

検証実験は hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタの量産ラインで行った。レジストパターンは露光波長 193nm の ArF エキシマレーザー光を露光光とした商用の露

光機で形成される。ロットは、図 3-4 で示したように、リソグラフィーでゲートのレジストパターンが形成された後、1)レジストパターン幅の測長、2)レジストトリミング、3)ハードマスクのエッチング、4)ポリシリコンのエッチング、5)ポリシリコンパターン幅の測長の順に処理されていく。1)と 5)の測長は測長機(CD-SEM: Hitachi S-9200、分解能 3nm)が使われ、2-4)のエッチングは第 2 章の図 2-2 で示したエッチング装置(Lam:Versys2300)が使われる。これら二つの装置は開発した APC システムに通信接続され、測長結果とエッチング条件のデータの受け渡しができるようになっている。

測長機は 2 週間に一度の割合でポリシリコンの較正用の標準パターン (calibration standard) で定期的に校正される。この定期的な較正作業により、ポリシリコンパターン幅での測長誤差が 1nm 以内に抑えられる。エッチング装置は、ウェハ 1 枚のエッチング処理が終わるたびに SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> プラズマ (ガス流量: SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> = 40/20 (sccm)、圧力 40 (mTorr)、ICP 電力: 800 (W)) で装置内壁のクリーニング処理を 2 分間行う。プラズマクリーニング処理で内壁に堆積したエッチング反応生成物のエッチングレートへの影響を抑制しているが、それでも図 3-11(a)の制御モデルの関係式の切片のロット毎の変化のグラフを見れば分かるように、エッチングバイアスは少しずつ変化していく。

APC システムでフィードバックする値は、ロットから分割し、先行処理したパイロットウェハ (1 枚) のエッチングバイアス (ウェハ平均値) である。図 3-7 にフィードバックにパイロットウェハを用いた処理の流れを模式的に示した。まずリソグラフィー後、ロットのレジストパターン幅が測長、フィードフォワードされ、そして更新前の制御モデルの関係式を使って計算されたエッチングパラメータがエッチング装置に渡される (図の①)。エッチング処理に入る前、ロットからパイロットウェハが 1 枚分割され、パイロットウェハが先行でエッチング処理される (図の②)。次いでパイロットウェハのポリシリコンパターン幅が測長される (図の③)。ポリシリコンパターン幅のロット平均値がフィードバックされ、制御モデルの関係式の切片が更新され、そして更新後の制御モデルの関係式を使って再計算されたエッチングパラメータがエッチング装置に渡される (図の④)。最後に、ロットの残りのウェハ(24 枚)がエッチング処理され、ポリシリコンパターン幅が測長される (図の⑤)。

検証実験の期間は 6 ヶ月であり、実験ロット数は 73 ロットである。実験ロットは、他の製品ロットに混じって処理されており、その割合は全処理ロット (実験ロット+製品ロット) の約 20% である。実験ロット間の平均のインターバル時間は 60 時間であり、その間量産ロットが平均で 4 ロット処理された。パイロットウェハとロット本体との間の平均のインターバル時間は 5 時間である。図 3-8 には、この処理のインターバルを模式的に示した。パイロットウェハとロット本体との間の平均のインターバル時間は、ロット間の平均のインターバル時間に比べると一桁小さい。

検証実験に先立って、制御モデルの関係式をパラメータ振りの実験で導出した。図 3-9 には、APC システムに組み込んだ制御モデルの関係式を示した。図 3-9 のプロット “■” で示した点は実験データであり、各点の実験誤差はレンジで ±0.2 から ±0.53 nm である。第

2章の図 2-8 の酸素分率とエッチングバイアスの関係は都合良く直線関係に近いので、図 3-9 の実験データを 1 次式でフィッティング<sup>18</sup>した。関係式の傾きの値は 0.6202 (nm / %) である。その傾きの値は実験期間中 3%程度しか変動せず、ほぼ安定していた。関数のエッチングバイアスの制御範囲は、酸素分率 64 ~ 86%に対して 26 ~ 38nm、レンジで±6 nm である。APC の精度を±1nm 以下にする目的から、分割幅  $q$  を 0.5 nm と決め、図 3-5 で示したエッチングパラメータの離散値  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の数は全部で 25 個とした。ちなみに検証実験の全期間のエッチングパラメータの丸め誤差  $\sigma_R$  の標準偏差 (実測値) は、 $1 \sigma$  で 0.149 nm となった。この値は式(3-2)で見積もられる値にほぼ等しかった。

ロット内のレジストパターン幅の全測長点数については、3.2 節で述べたように、パターン幅の平均値を求める際の平均誤差  $\sigma_E$  に関する 95%の信頼区間 ( $=1.96 \sigma_E$ ) とプロセスモデルコントローラの制御モデルの制御範囲の分割幅  $q$  を比較して、 $1.96 \sigma_E < q / 2$  を満足するために最低限必要な数とした。レジストパターン幅のロット内ばらつき  $\sigma$  は 1.00nm であったので、分割幅  $q = 0.5\text{nm}$  のときのロットあたりの測長点数は、ラインパターン 1 種類つき 130 点 (孤立配置と密集配置とで、合計 260 点) となった。このときのレジストパターン幅の平均誤差  $\sigma_E$  の標準偏差は  $1 \sigma$  で 0.09 nm である。ポリシリコンパターン幅の測長点数は、レジストパターン幅のロット内の標準偏差 ( $1 \sigma = 1.00\text{nm}$ 、平均値) とポリシリコンパターン幅のロット内の標準偏差がほぼ同じだったので (レジスト :  $1 \sigma = 1.00\text{nm}$ 、ポリシリコン :  $1 \sigma = 1.16\text{nm}$ 、いずれも期間中の平均値)、レジストパターン幅の測長点数と同じ点数とした。

### 3. 3. 2 検証結果

図 3-10(a)には、エッチング前のゲートのレジストパターン幅とエッチング後のポリシリコン幅 (最終物理ゲート長) のロット平均値のヒストグラムを示した。横軸のレジストパターン幅の値は全レジストパターンの平均値からの偏差 (ずれ) であり、ポリシリコンパターン幅の値はねらい値からの偏差 (ずれ) である。レジストパターン幅の値は 9.08 nm の範囲で分布し、その標準偏差は  $1 \sigma$  で 2.00 nm である。一方、ポリシリコンパターン幅の値は 2.49nm の範囲で分布し、その標準偏差は  $1 \sigma$  で 0.55nm である。処理されたロットのうち 92%が物理ゲート長のねらい値の±1nm 以内に収まる結果となった。

図 3-10(b)には、エッチングバイアスの疎密差 (孤立配置のパターンの値 - 密集配置のパターンの値) のロット毎の変化を示した。横軸はロットが処理された順番に並んでいる。エッチングバイアスの疎密差はほぼ±1nm 以内に収まっている。

図 3-10(c)には、ロット内のパターン幅のばらつきのエッチング前後の比のロット毎の変化を示した。エッチング前後のロット内ばらつきの比はほぼ 1 付近で推移しており、APC のエッチングパラメータの調整によるロット内のばらつきへの影響はほとんどない。孤立配置と密集配置のパターンを同数ずつ合わせた、ロット内ばらつきの期間中の平均値は、レジストで  $1 \sigma = 1.00\text{nm}$ 、ポリシリコンで  $1 \sigma = 1.16\text{nm}$  となった。

物理ゲート長のランダムばらつきは、ロット内とロット間のばらつきの自乗平均から  $3\sigma = 3.85\text{nm}$  であり、物理ゲート長のねらい値の  $\pm 1\text{nm}$  以内に収まったロットの割合は 92% であるから、加工の精密度の目標値  $3\sigma = 4.00\text{nm}$  と正確度の目標値 90% 以上を達成することができた。さらに、物理ゲート長のシステムティックなばらつきの原因となる、レジストトリミングに起因する疎密パターン間のエッチングバイアスの差もほぼ  $\pm 1\text{nm}$  以内に収めることができた。

### 3. 3. 3 APC のフィードバックの効果に関する考察

図 3-11(a) に制御モデルの関数の切片のシフト量のロット毎の変化を示した。切片のシフト量の変動の幅は  $8.12\text{ nm}$  であった。パイロットウェハのエッチングバイアスをフィードバックして制御モデルの関数の切片の更新を行っていないければ、図 3-10(a) のポリシリコンパターン幅の分布の幅は  $8.12\text{nm}$  以上になったと推測されるので、APC のフィードバックの効果（予測の正確性）はかなり高かったと結論づけられる。図 3-11(b) は時系列分析のために (a) のグラフの横軸をプラズマの累積オン時間に変更したグラフである。プラズマ累積オン時間が長くなりプラズマチャンバー内壁に堆積する反応生成物が増加していくのであれば、その結果として制御モデルの関数の切片のシフト量も単調に増加あるいは単調に減少するといった変化が持続するような、傾向変動 (Trend) がグラフに明確に現れるのではないかと期待した。しかし実際には切片のシフト量は増加したり減少したりしており、その変化は不規則変動 (Irregular variation) に近い。この理由については、エッチング装置の使用頻度が高い時はエッチング反応生成物の堆積量が増加し、逆に使用頻度が低い時はエッチング反応生成物の堆積量が減少するので、不規則に使用頻度が高くなったり低くなったりした結果、図のような切片のシフト量の増減の仕方をしたのだろうと考えられる。

図 3-12 のプロット”◆”のグラフは、パイロットウェハのエッチングバイアスの平均値とロットのエッチングバイアスの平均値との差、すなわちフィードバックの予測誤差のロット毎の変化である。また図 3-12 のグラフのプロット”○”のグラフは、ロットを処理するとき一番目に処理したウェハ（パイロットウェハではない）のエッチングバイアスとロットのエッチングバイアスの平均値との差である。二つのグラフは非常に近いことから、フィードバックの予測誤差の大きさは、ロット内の 1 枚目効果 (First Wafer Effect) の大きさに非常に近いことがわかる。既に述べたように (図 3-8 参照)、ロットとパイロットウェハとの間のエッチング処理の平均のインターバルは  $5\text{ hour}$  であるが、予測のリードタイムがこの程度の時間であれば予測誤差はかなり小さくできるということがわかる。

ここで、検証実験のパイロットウェハのエッチングバイアスを使った予測の正確性と、実験結果から求めたロットのエッチングバイアスを使った予測の正確性とを定量的に比較してみる。図 3-11(a) の制御モデルの関数の切片のロット毎の変化のグラフの差分をとれば (予測誤差 = 予測処理時の直前に処理されたロットの値 - 予測処理時のロットの値)、ロットのエッチングバイアスを使ったフィードバックによる予測誤差を計算することができる。予

測の正確性を予測誤差の標準偏差で測定してみる。図 3-13(a)には、パイロットウェハのエッチングバイアスを使ったフィードバックの予測誤差(実験値)の統計分布を示した。そして図 3-13(b)には、予測処理時のロットの直近に処理されたロットのエッチングバイアスを使って計算した予測誤差(計算値)の統計分布を示した。パイロットウェハのフィードバックの予測誤差の標準偏差は  $1\sigma$  で  $0.50\text{nm}$  であるが、ロットのフィードバックの予測誤差の標準偏差は  $1\sigma$  で  $0.82\text{nm}$  となった。ロットの予測誤差はパイロットウェハよりもかなり大きくなる。ロット間のエッチング処理の平均のインターバル、すなわち予測のリードタイムは  $60\text{hour}$  (図 3-8 参照)であり、パイロットウェハとロット間の値  $5\text{hour}$  よりもかなり長い。

図 3-13(a-b)には二つの予測誤差の統計分布にガウス分布を重ねて表示したが(標準偏差は上記二つの値)、予測誤差の分布はガウス分布に近い。本章の 3.2 節で APC システムのデータ処理の過程で発生する誤差として、平均誤差  $\sigma_E$  ( $1\sigma = 0.09\text{nm}$  (実測値))、丸め誤差  $\sigma_R$  ( $1\sigma = 0.149\text{nm}$  (実測値))、そして予測誤差  $\sigma_p$  を挙げたが、これらの誤差の統計分布がガウス分布であると仮定して、これらの二乗平均により APC システムの全体の誤差の標準偏差を計算すると、検証実験のパイロットウェハを使ったフィードバックの場合では  $1\sigma$  で  $0.54\text{nm}$  となる。この値は図 3-10(a)のポリシリコンパターン幅の標準偏差  $0.55\text{nm}$  とほぼ整合はとれている。APC システム全体の誤差は予測誤差の大きさとあまり変わらないことがわかる(他の誤差が小さいため)。ちなみに、上記三つの誤差の二乗平均によりロットを使ったフィードバックの場合の APC システム全体の誤差の標準偏差を見積もると  $0.84\text{nm}$  となる。

予測の正確性を標準偏差ではなく、的中率(accuracy)で測定してみる。ここでの的中率とはポリシリコンパターン幅のねらい値からのずれが  $\pm 1\text{nm}$  以内に収まるロットの割合と定義する。図 3-14 にフィードバックの予測の種類による的中率(Accuracy)を示した。横軸は、パイロットウェハを使った場合に加え、予測処理時のロットの直近に処理されたロットを使う場合(lot#: N-1)、直近ロットの 1 ロット前のロット(lot#: N-2)、同じく 2 ロット前のロット(lot#: N-3)、そして同じく 3 ロット前のロット(lot#: N-4)を使った場合の計算結果も示した。パイロットウェハを使ったフィードバックの的中率が  $92\%$  と最も高く、直近ロットを使ったフィードバックの的中率はそれより  $20\%$  低い  $72\%$  となった。そして直近ロットよりもより先に処理された過去ロットを使ったフィードバックでは、的中率はさらに低下する。予測処理時よりも三つ前の過去ロット(lot#: N-4)では  $52\%$  と直近ロットの場合と比較して  $20\%$  も低下する。この場合の予測のリードタイムは平均で  $160\text{hour}$  (約 1 週間 =  $168\text{hour}$ ) である。

したがって、APC システム全体の誤差を小さくするためには、フィードバックでの予測のリードタイムをなるべく短くするのがよい。また複数の過去ロットの結果を平均化して予測誤差を小さくするときは、予測のリードタイムの短いデータに限って平均化すべきである。予測のリードタイムが長いデータを含めて平均化してしまうと、逆に予測の誤差を大きくし

てしまうことが考えられるからである。

### 3. 4 まとめ

hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm のトランジスタのゲートエッチング加工での、パターン疎密に依存しない  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマのレジストトリミングを使った、アドバンスドプロセスコントロール (APC) 技術を確立した。この APC には、第 2 章の  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマの  $\text{SO}_2/\text{O}_2$  混合比とエッチングバイアスとの関係式をモデルとして組み込んだ。

トランジスタの量産ラインで期間 6 ヶ月、実験ロット数 73 ロットでの APC の加工精度の検証実験を行った。その結果、物理ゲート長のランダムばらつきは  $1\sigma=3.85\text{nm}$ 、物理ゲート長のねらい値の  $\pm 1\text{nm}$  以内に収まったロットの割合は 92% となり、加工の精密度の目標値  $1\sigma=4.00\text{nm}$  と正確度の目標値 90% 以上を達成することができた。そして物理ゲート長のシステムティックなばらつきの原因となる、レジストトリミングに起因する疎密パターン間のエッチングバイアスの差もほぼ  $\pm 1\text{nm}$  以内に収まることも確認した。

さらに APC のフィードバック制御の効果については、制御モデルの切片の値の変動幅は 8.12nm であったが、持続予測法によりパイロットウェハのエッチングバイアスをフィードバックした結果、制御モデルの切片の値の誤差を  $1\sigma$  で 0.5nm まで抑制することができた。また APC システムの全体の誤差は制御モデルのエッチングバイアスの誤差、すなわちフィードバックの予測誤差が大半を占めること、そして APC システム全体の誤差を小さくするためにはフィードバックでの予測のリードタイムを短くするのが有効であることを明らかにした。

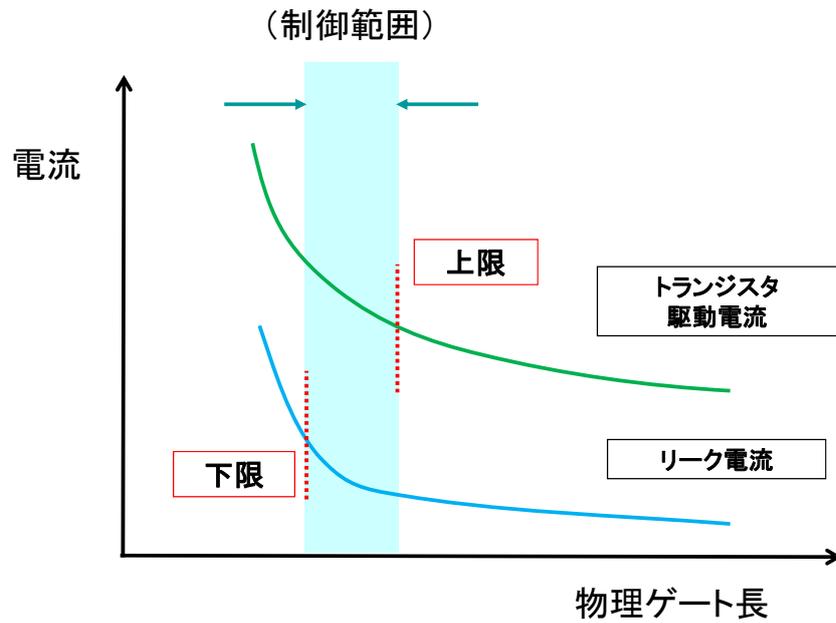


図 3-1: トランジスタの物理ゲート長とトランジスタ駆動電流とリーク電流の関係のグラフ。

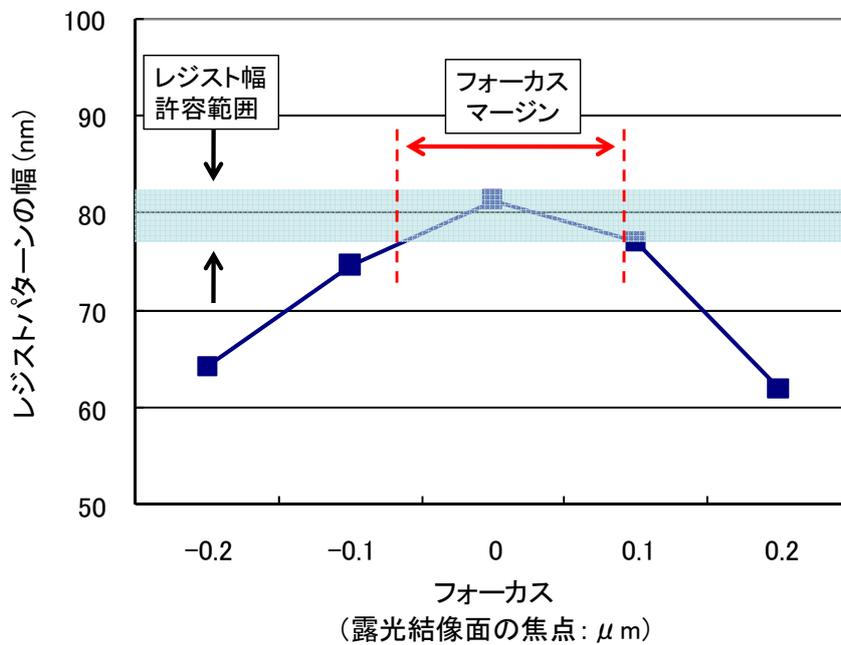


図 3-2: ArF エキシマーレーザー（波長：193nm）を露光源とした露光機のフォーカスと孤立ゲートパターンのレジストパターン幅との関係のグラフ。  
レジストパターンの構造は第 2 章の図 2-3 で示した。

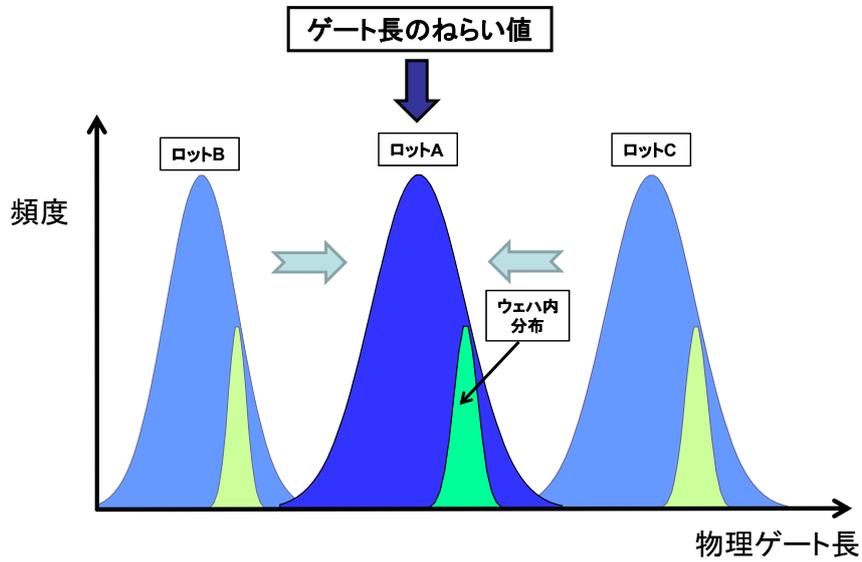


図 3-3: ロットの物理ゲート長がロット毎にばらついた様子を示した模式図。

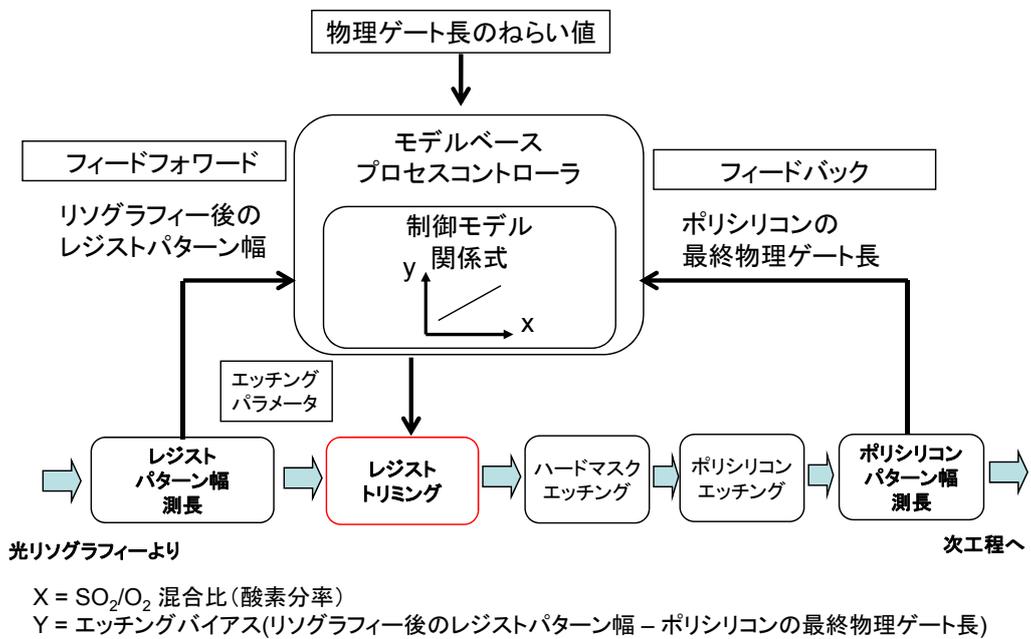


図 3-4: ゲートエッチングプロセスのプロセスの流れと APC システムのデータの流れ。

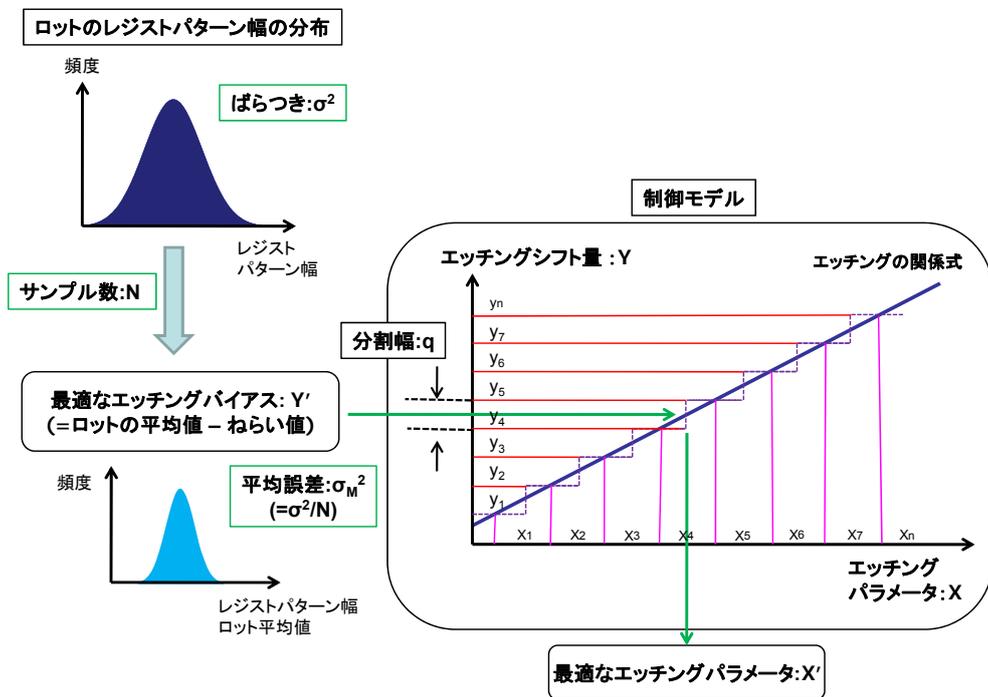


図 3-5: リソグラフィー後のレジストパターン幅のロット平均値がコントローラにフィードフォワードされてから最適なエッチングレシピが求められるまでのデータ処理の流れ。

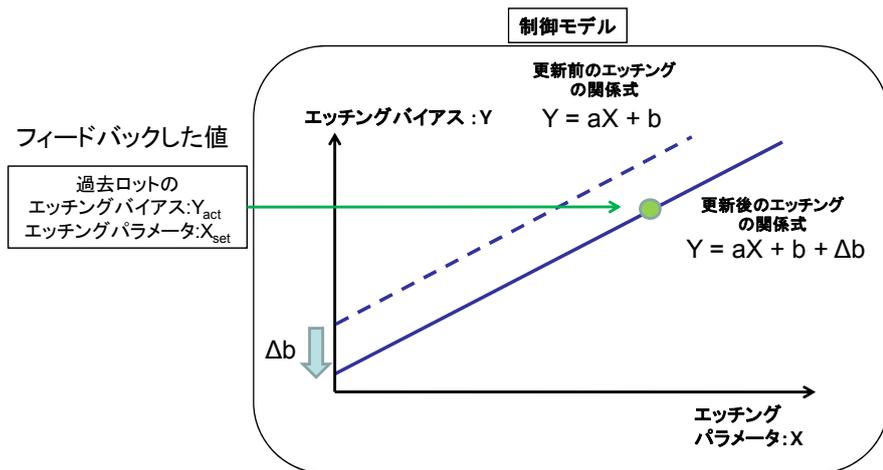


図 3-6: フィードバック制御による制御モデルの関係式の更新の方法を示した模式図。

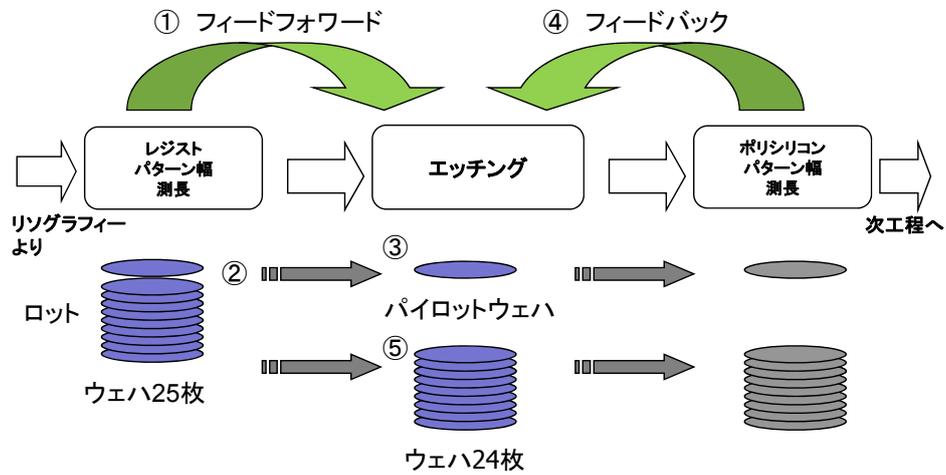


図 3-7: フィードバック制御にパイロットウェハを用いた、検証実験でのロットの処理の流れ。

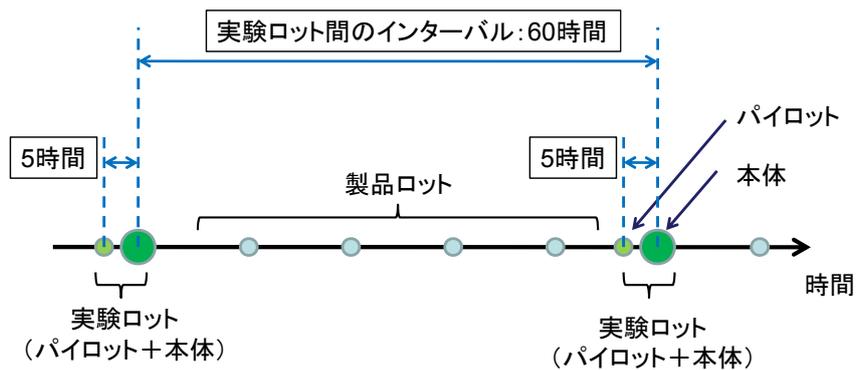


図 3-8: 検証実験ロットとそれ以外の製品ロットのエッチング処理のインターバルを表した模式図。

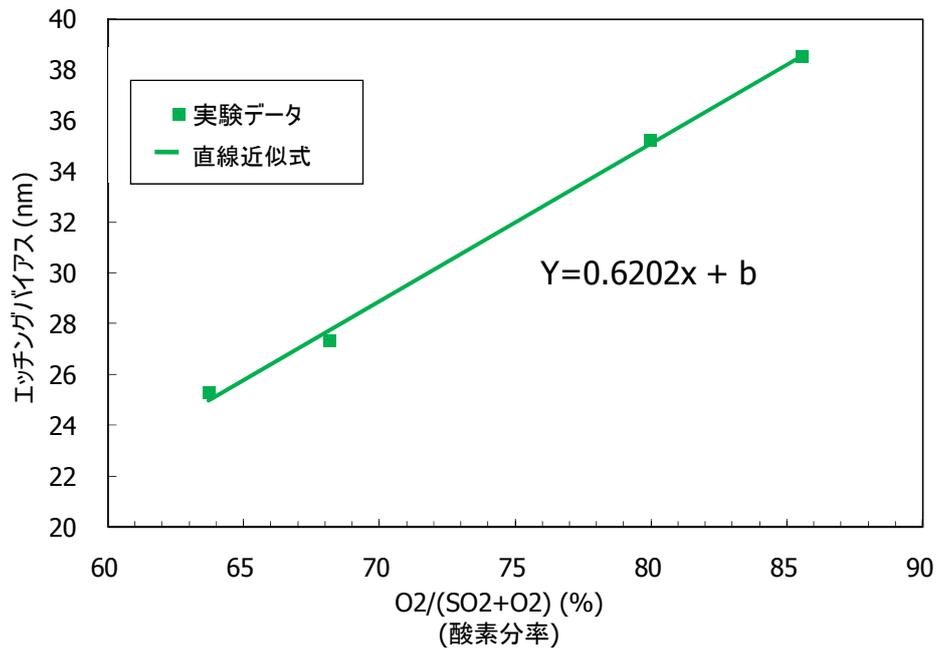


図 3-9: 検証実験で使用したプロセスコントローラの制御モデルの関係式のグラフ。  
横軸は SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスの酸素分率(O<sub>2</sub> / (SO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>))である。オーバーエッチング時間は 44 (%)一定である。

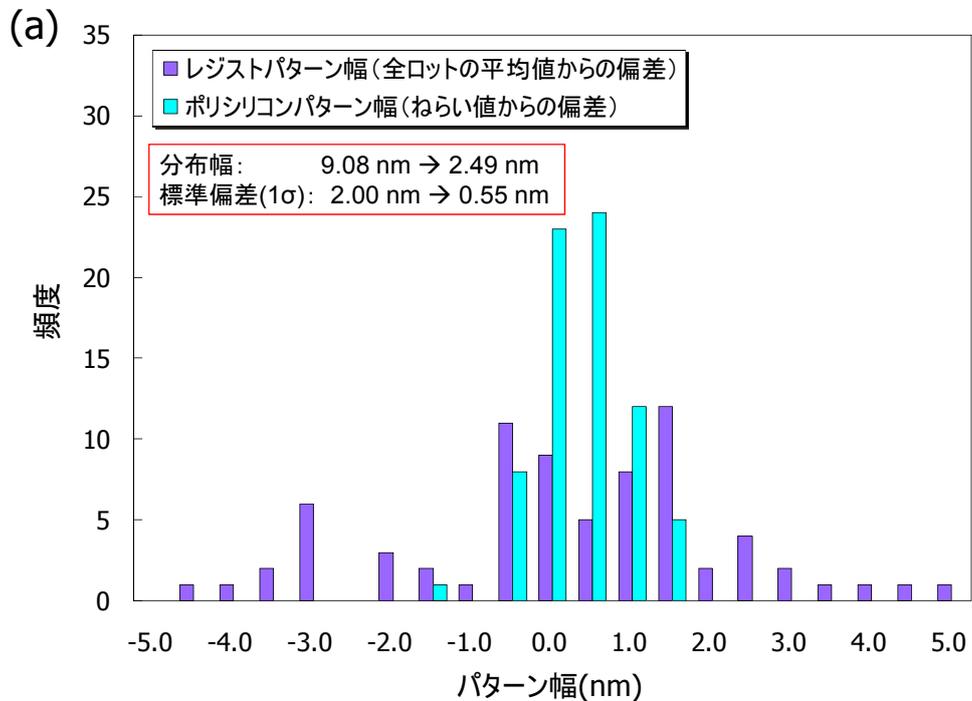


図 3-10 (a): リソグラフィー後のレジストパターン幅とエッチング後のポリシリコン幅のロット平均値のヒストグラム<sup>19)</sup>。(次ページに続く)

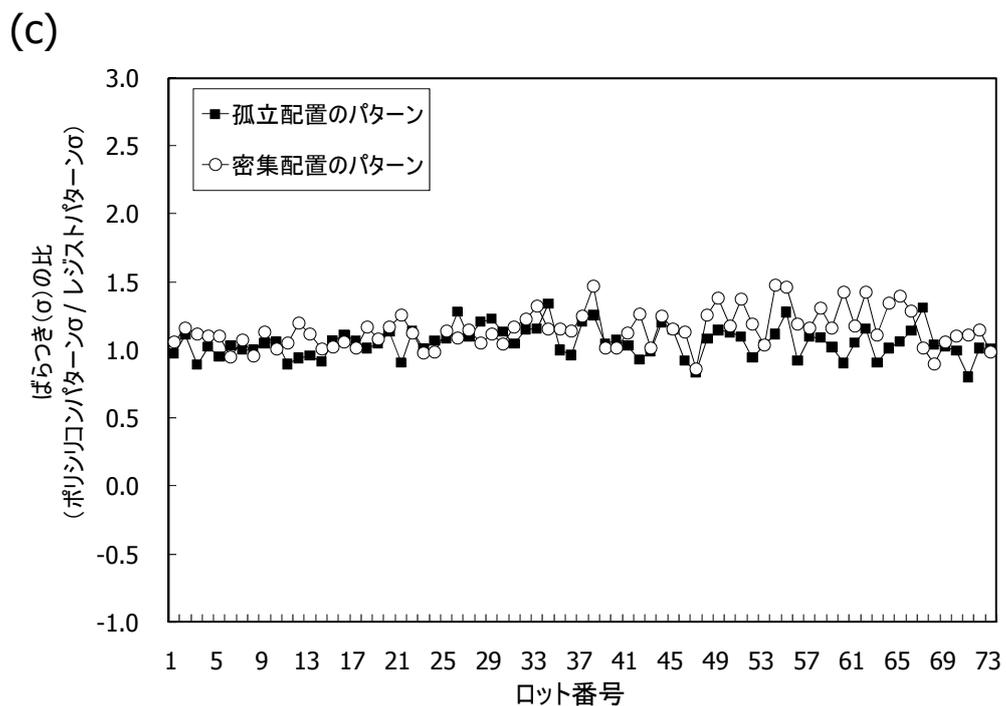
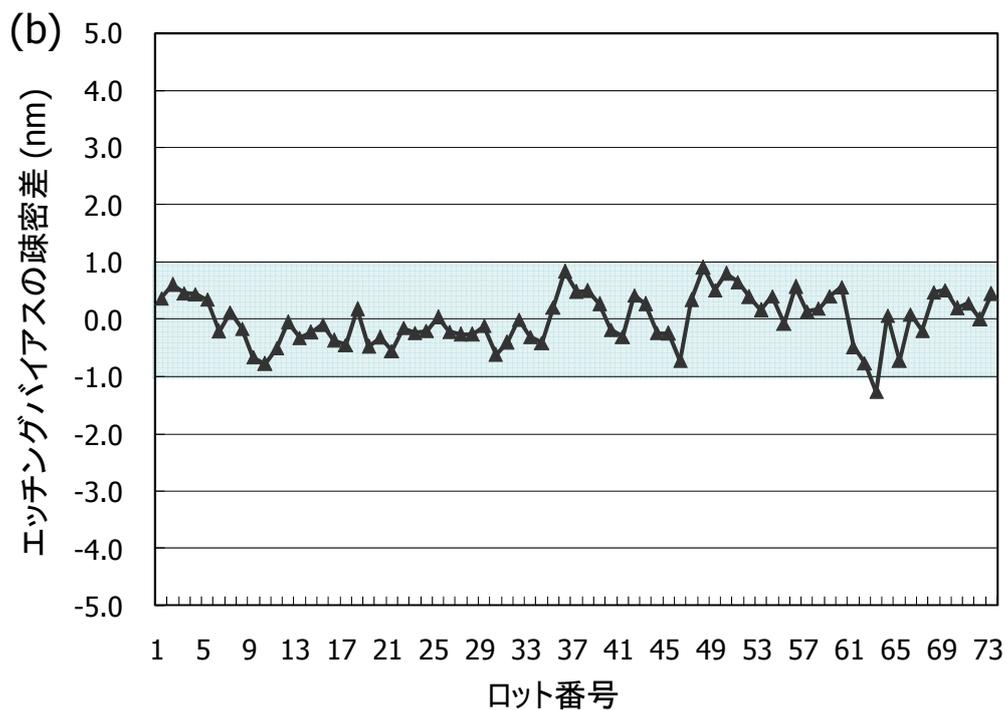
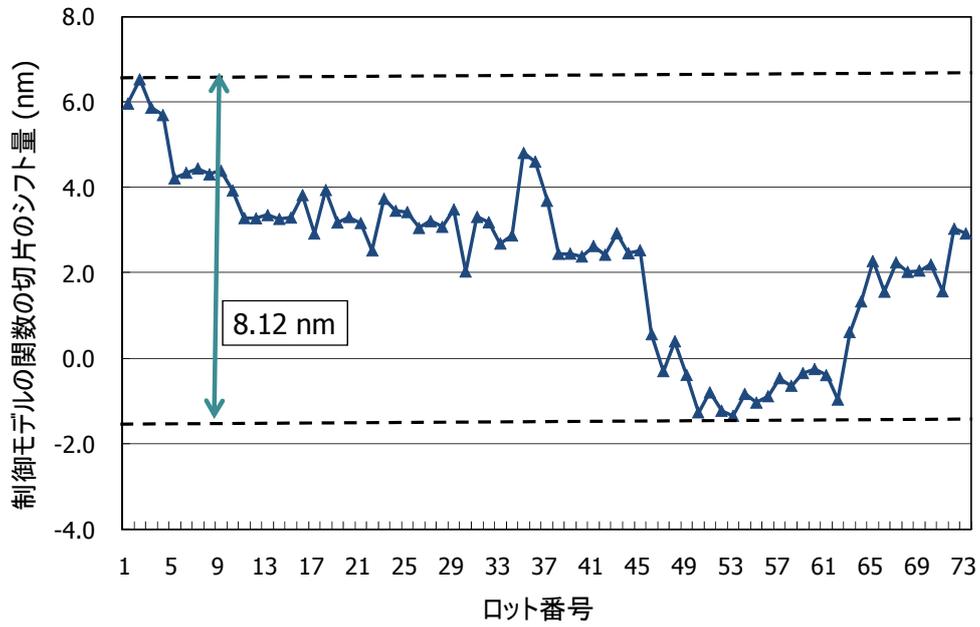


図 3-10 (b - c): (b) エッチングバイアスの疎密差 (孤立配置のパターンの値 - 密集配置のパターンの値) のロット毎の変化のグラフ。(c) ロット内のパターン幅のばらつきのエッチング前後の比のロット毎の変化のグラフ。

(a)



(b)

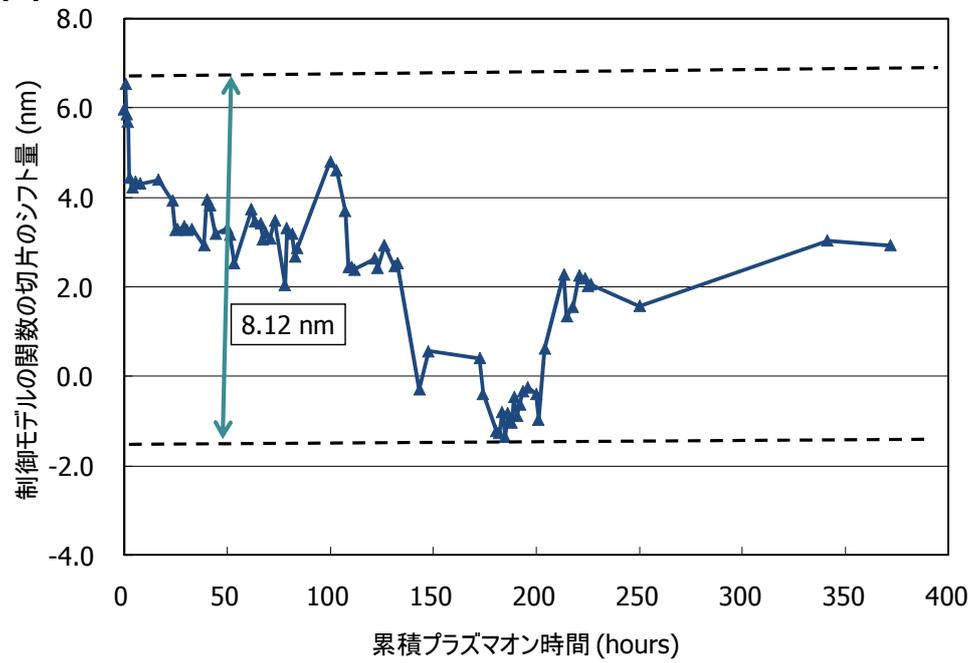


図 3-11 (a - b): (a) APC システムに組み込んだ制御モデルの切片の初期値からのシフト量のロット毎の変化のグラフ。(b) 同じ切片のシフト量のプラズマの累積オン時間による変化のグラフ。

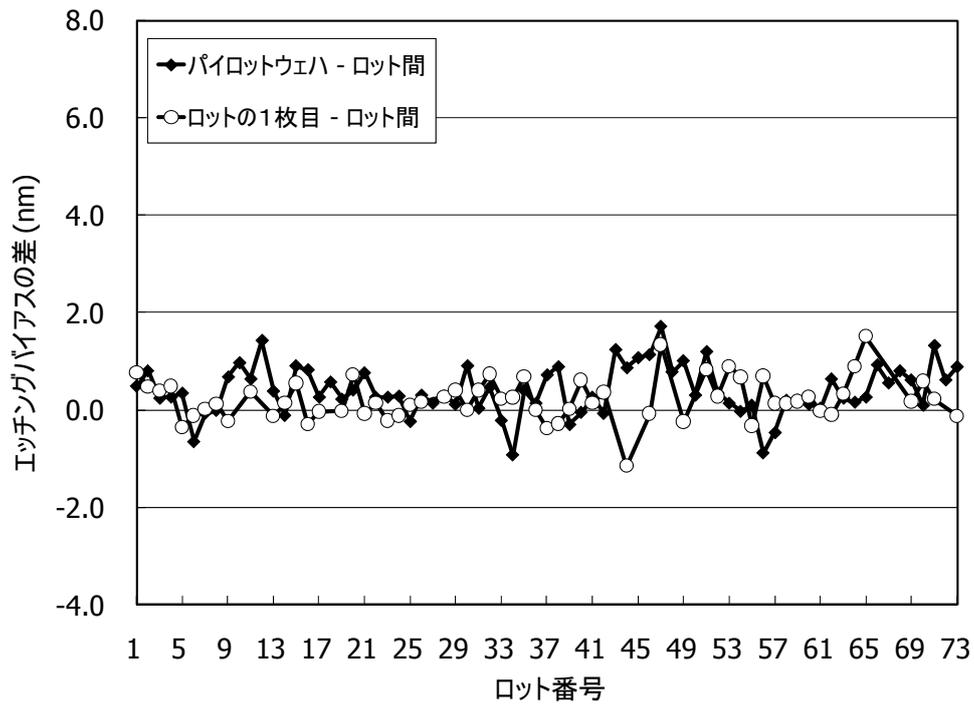
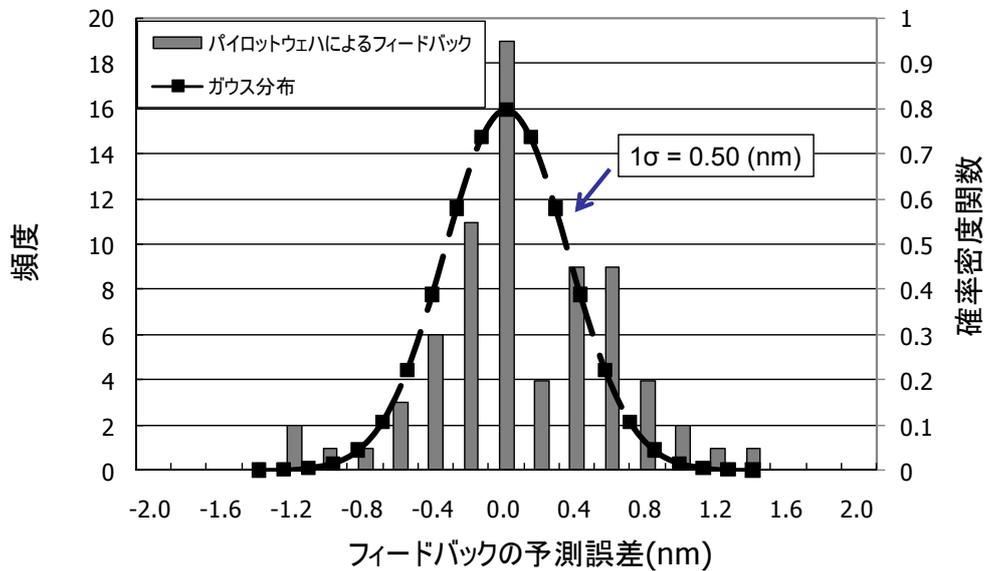


図 3-12: プロット◆のグラフは、パイロットウェハとロットとの間のエッチングバイアスの差、すなわちパイロットウェハを用いたフィードバックの予測誤差のロット毎の変化のグラフ。プロット○のグラフは、ロットで一番目に処理したウェハ（パイロットウェハではない）とロットとの間のエッチングバイアスの差のロット毎の変化のグラフ。

(a)



(b)

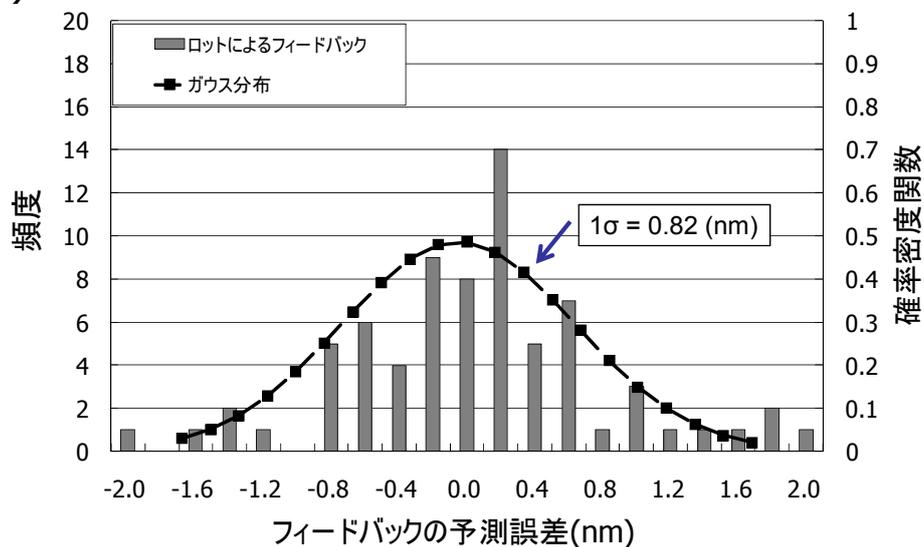


図 3-13 (a - b): (a) フィードバック制御でパイロットウェハのエッチングバイアスを使った予測誤差の統計分布 (実測値)。(b) 予測処理時のロットの直近で処理されたロットのエッチングバイアスを使った予測誤差の統計分布 (計算値)。

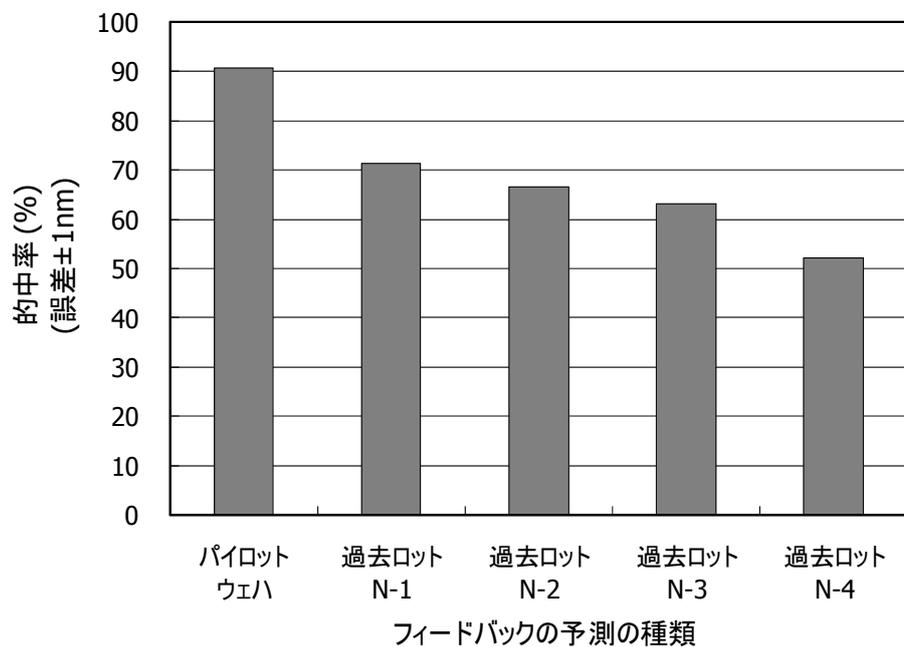


図 3-14：予測の種類による的中率(Accuracy)。

的中率はポリシリコンの最終物理ゲート長のねらい値からのずれが±1nm 以内に収まるロットの全ロットに対する割合とした。横軸は、順に、パイロットウェハのエッチングバイアスを用いた予測、予測処理時よりもより先に処理されたロット (N-1：直近、N-2：直近よりも1ロット前、N-3：直近よりも2ロット前、N-4：直近よりも3ロット前) のエッチングバイアスを用いた予測。

## 第4章

### SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>、ICP プラズマの In-situ 計測

## 4 SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>、ICP プラズマの In-situ 計測

### 4. 1 序論

第 2 章では、hp 90nm 技術世代の物理ゲート長 40nm トランジスタの SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術について述べた。図 2-2 の商用の ICP プラズマエッチング装置を使い、リソグラフィー後のゲートのレジストパターンが形成されている ArF レジスト層と反射防止膜層の 2 層構造を、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマで、反射防止膜層をエッチングしながら、レジストパターンを 80nm から 40nm の幅にトリミングする。そして SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比によりレジストパターン幅のトリミング量を変えることで、ポリシリコンの最終物理ゲート長を調整する。図 2-8 のグラフはエッチングバイアス（リソグラフィー後のレジストパターン幅からポリシリコンの最終ゲート長を引いた値）と酸素分率： $O_2/(SO_2+O_2)$  との関係であるが、酸素分率を 55% から 75% の範囲で振ると、エッチングバイアスが ±6nm のレンジで変化する。膜厚一定の反射防止膜層が完全にエッチングされた状態でトリミング量が変わったということは、レジストパターン側壁のエッチングレート（シリコン基板に対して水平な方向のエッチングレート）と、反射防止膜のエッチングレート（シリコン基板に対して垂直な方向のエッチングレート）との比、すなわちエッチングレートの異方性が変化したことを意味する。

本研究の SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術は、第 2 章の序論で述べたように、二層レジストの O<sub>2</sub> プラズマエッチングでの SO<sub>2</sub> 添加効果の報告<sup>20,21, 22, 23</sup>をヒントに開発された。通常、フォトレジストは炭化水素系材料であるので O<sub>2</sub> プラズマでエッチングされる。フォトレジストのエッチングには O<sub>2</sub> プラズマ中で生成された酸素原子が寄与するが、二層レジストのプラズマエッチング、すなわち上層レジストのパターンを下層のレジストに転写するとき、O 原子によるエッチングは等方的なのでパターン側壁の後退が生じる。C. Monget ら<sup>23</sup>は、同じ二層レジストのプラズマエッチングで、O<sub>2</sub> プラズマよりも SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの方がレジストパターン側壁のエッチングレートが抑制され、その結果エッチング転写精度が向上すること（垂直なパターン形状が得られること）を明らかにした。さらに、垂直なパターン形状が得られる SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの条件でエッチングしたときのレジスト膜表面、あるいはレジストパターン側壁の表面には、硫黄単体、炭素と硫黄の化合物<sup>23</sup>、そして高次に酸化された硫黄(SO<sub>3</sub> or SO<sub>4</sub>)<sup>21,22,23</sup>が存在することが報告されている。つまり、レジスト表面に硫黄が堆積することでエッチングが異方的になるといわれている。そこで、酸素分率でレジストパターンのエッチングレートの異方性が変化するメカニズムを調べるために、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比を振ったときのレジストのエッチングレートの異方性の変化と、レジスト表面の化学組成（特に硫黄を含む物質）やプラズマから生じた原子、分子（特に酸素原子）の変化との関係を調べた。

本章では、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマでのレジストのエッチングレートの異方性の測定結果と、レジスト表面の化学組成、さらにはプラズマから生じた正イオン、中性の原子・分子、そして

エッチング反応生成物の In-situ 計測結果を示す。そして SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比によりレジストのエッチングレートの異方性が変化する理由を考察する。

#### 4. 2 実験装置と実験方法

実験装置の概略を図 4-1(a-b)に示した。実験装置は、誘導結合型プラズマの GEC セル (GEC Reference Cell) と呼ばれる研究用のプラズマ装置を用いた<sup>24,25</sup>。誘導結合型プラズマ(ICP)は、直径 10 cm、厚さ 5 cm の円筒状の形である。コイルの巻き数は 5 ターンであり、コイルに印加した高周波電力の周波数は 13.56 MHz である。高周波電力はコイル直下の石英窓(石英の厚さ 10mm)からプラズマチャンバー内に導入される。サンプル(Sample)が載置されるアルミの RF バイアス電極(RF Bias Electrode)は、常に 20°C の温度に保たれる。サンプルに自己バイアス電圧を印加するための高周波電力の周波数は 2MHz である。プラズマチャンバーは排気速度 600 ls<sup>-1</sup> のターボ分子ポンプ (Turbo-Molecular Pump : TMP) で排気される。プラズマチャンバーのベースプレッシャー (base pressure) は  $5 \times 10^{-7}$  Torr である。プラズマチャンバー内部に導入されるガス流量はマスフローコントローラにより制御され、プラズマチャンバー内部のガス圧力はキャパシタンスマノメータゲージと自動開閉バルブの組み合わせで制御される。

プラズマ光は、プラズマ発生領域の中心軸上の電極間中心のプラズマ光をレンズ光学系で集光し、分光器 (分解能 0.01 nm) に導入、分光し、そして注目する波長の光を観測する。プラズマ中の正イオンと活性種を観測するため、四重極質量分析計 (Quadrupole Mass Spectrometer: QMS、Pfeiffer PPM422) がプラズマチャンバーの側面に取り付けられている。プラズマ中の正イオンと中性の原子・分子はプラズマ領域の中心から 9cm 離れた場所に位置する直径 0.1mm のアパチャーから QMS 内に取り込まれる。中性の原子・分子を電離させるための電子ビームのエネルギーは 70eV であり、QMS 内部は排気速度 200 ls<sup>-1</sup> のターボ分子ポンプで排気した。QMS 内部のベースプレッシャーは  $1 \times 10^{-9}$  Torr 以下であり、プラズマ点灯時の QMS 内部の圧力は  $1 \times 10^{-6}$  以下に維持される。正イオン電流密度 ( $J_p$ ) と電子温度 ( $T_e$ ) はラングミュアプローブにより測定される。 $J_p$  と  $T_e$  の測定中だけ、ラングミュアプローブの先端部分をプラズマ発生領域の中心付近に移動した。 $J_p$  と  $T_e$  からプラズマ領域の中心の正イオン密度を見積もられる。

エッチング前後のレジスト表面の化学組成は X 線光電子分光法 (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS)により分析した。サンプルは、分析チャンバーとプラズマチャンバーとの間を、真空搬送される。分析チャンバーには Mg K $\alpha$  の X線源 (VG Microtech XR3)と電子エネルギー分析器(VG Microtech CLAM2)が装備されている。サンプルとエネルギー分析器との角度は 45°である。分析チャンバーはプラズマチャンバーとほぼ同サイズであり、排気速度 1000 ls<sup>-1</sup> のターボ分子ポンプで排気される。分析チャンバーのベースプレッシャーは  $1 \times 10^{-10}$  Torr であり、分析時の圧力は  $2 \times 10^{-9}$  Torr 以下に維持される。

#### 4. 3 実験結果と考察

##### 4. 3. 1 実験条件について

実験では、ガス圧力を 30mTorr 固定にし、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの SO<sub>2</sub> 分率 (SO<sub>2</sub>/(SO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)) をパラメータとした。SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガスは、第 2 章のレジストトリミングプラズマと同様に、He ガスで同じ率で希釈した。SO<sub>2</sub> ガスと O<sub>2</sub> ガスを合計したガス流量は 6 sccm であり、He ガスの流量は 12 sccm である。ガス圧力を 30mTorr に設定した理由は、繰り返し安定にプラズマを発生させる目的と、もう一つは QMS とラングミュアプローブの測定感度を測定可能なレベルに持っていくためである。

ICP パワー一定で SO<sub>2</sub> 分率 (SO<sub>2</sub>/(SO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)) を変化させると、プラズマ密度の急激な変化が観測される。プラズマ密度の急激な変化はプラズマからの発光強度の変化から把握することができる。図 4-2(a-c) に ICP パワーと SO<sub>2</sub> 分率を変化させたときのプラズマからの発光強度を示した。波長は、O<sub>2</sub><sup>+</sup> (4Σ<sub>g</sub> → 4Π<sub>u</sub>) : 558.0nm<sup>26</sup>、O (3p<sup>3</sup>P → 3s<sup>3</sup>S) : 844.6nm<sup>27</sup>、SO (A<sup>3</sup>Π → X<sup>3</sup>Σ<sup>-</sup>, for the (0,0) band) : 263.4nm<sup>28</sup> である。ICP パワーが 300 W よりも高いときに SO<sub>2</sub> 分率を上げていくと発光強度が急激に上昇することがわかる。SO<sub>2</sub> 分率を振ったときに、この急激なプラズマの変化を避けるため、以降の実験では、ICP パワーを 300W よりも十分低い値、180W 一定とした。

図 4-3 に ICP パワー 180W での SO<sub>2</sub> 分率による電子温度と発光強度の変化を示した。電子温度が SO<sub>2</sub> 分率の増加に対して若干増加するのみである。O<sub>2</sub><sup>+</sup> (4Σ<sub>g</sub>) 分子イオンと O(3p<sup>3</sup>P) 原子からの発光強度は SO<sub>2</sub> 分率の増加に対して減少する。一方、SO(A<sup>3</sup>Π) 分子の発光強度は SO<sub>2</sub> 分率の増加に対して増加する。これらのグラフの変化の仕方は、図 4-7、図 4-8 の QMS で測定された、SO<sub>2</sub> 分率による正イオンと中性の原子・分子の密度のグラフに似ている。電子温度の変化が小さいので、発光の大きさが密度の大きさをそのまま反映していると考えられる。

本実験では、二種類のレジストを用いた。一つは電子ビーム (EB: Electron Beam) 露光用のレジスト (SIPR-EP001-0.6) である。シリコン基板上に塗布した EB レジスト膜の一部に孤立配置のラインパターンを形成し、基板に対して水平方向と垂直方向の、両方のエッチングレート (エッチングレートの異方性) を評価した。もう一つは、第 2 章、第 3 章のゲートエッチングで用いた、露光源が ArF エキシマーレーザー用のメタクリレート系レジスト (methacrylate-based resists for 193 nm lithography、炭素の密度は 3.94 × 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>) である。本研究の SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマの条件では、EB レジストと ArF レジストのエッチングレートはほぼ同じである。シリコン基板上に塗布した ArF レジスト膜を用いて、基板に対して垂直方向のエッチングレート、エッチング反応生成物、そしてレジスト表面の化学組成を評価した。

#### 4. 3. 2 レジストのエッチングレートの異方性

エッチングレートの異方性、具体的には、レジスト膜のエッチングレート（シリコン基板に対して垂直な方向のレジストのエッチングレート）と、レジストパターン幅のエッチングレート（シリコン基板に対して水平な方向のレジストパターン側壁のエッチングレート）を、 $\text{SO}_2$ 分率を振って測定した。レジストパターンは EB 露光装置（ELIONIX:ELS-5700）で露光形成した。図 4-4 にレジストパターンの SEM 写真を示した。レジストパターンは孤立配置のラインパターンであり、レジスト膜厚は 346nm、レジスト幅は 212nm である（アスペクト比 1.61）。 $\text{SO}_2$ 分率 10%、31%、50%、68%の 4 条件で 90 秒間エッチングした。図 4-5 にエッチング前後のレジストパターンの CD-SEM 写真を示した。エッチング後のレジスト表面のラフネスがエッチング前と比べて若干大きくなっているが、レジストパターン幅は、ほぼ一様にトリミングされている様子がわかる。

図 4-6 に、レジストパターン幅のエッチングレート(Lateral Etch Rate: 水平方向のエッチングレートの 2 倍の値)とレジスト膜のエッチングレート (Vertical Etch rate 垂直方向のエッチングレート)、そしてエッチングレートの L/V 比 (水平/垂直比)、すなわち異方性を示した。レジストパターン幅は CD-SEM から計測し、レジスト膜の厚さは干渉膜厚計で計測した。エッチングレートの L/V 比は第 2 章のゲートパターンのエッチングバイアスに相当する (図 2-8 参照)。 $\text{SO}_2$ 分率が 10 ~ 50%でエッチングレートの L/V 比が変化し、そして L/V 比の値は  $\text{SO}_2$ 分率が高くなるほど小さくなった。したがって図 4-1 の研究用のプラズマエッチング装置でも、第 2 章の商用のエッチング装置で測定した、図 2-8 のグラフと同様の結果が得られることを確認した。

#### 4. 3. 3 プラズマ中の正イオンと中性の活性種

プラズマ中の正イオンと中性の原子・分子の  $\text{SO}_2$ 分率依存を評価した。

$\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマでは、 $\text{SO}_2^+$ 、 $\text{O}_2^+$ 、 $\text{SO}^+$ 、そして  $\text{O}^+$  などの正イオンが生成される<sup>29,30</sup>。 $\text{SO}^-$ 、 $\text{O}^-$ 、そして  $\text{S}^-$  のような負イオンも解離性電子付着により生成されうる<sup>31</sup>。しかし負イオンはプラズマのシースを越えて QMS 入り口のアパチャーに入らないため、プラズマをオフしない限り負イオンの検出はできない。これまでシリコンプロセスに応用されたプラズマエッチングプラズマでは、正イオンがエッチング反応に大きく寄与するので正イオンだけで十分であると考えられる。

プラズマ中の正イオンの  $\text{SO}_2$ 分率に対する変化を図 4-7 に示した。このときレジスト膜のエッチングは行っていない。希釈ガスとして混合した He ガスから生じる  $\text{He}^+$ の密度は他のイオン密度よりも  $10^4$ も小さく、正イオンのほとんどが  $\text{SO}_2$ と  $\text{O}_2$ 由来である。 $\text{SO}_2$ 分率を増加させるとトータルの正イオン密度は大きく減少する。正イオン密度全体の変化は、主に  $\text{O}_2^+$ と  $\text{O}^+$ の変化によるものである。 $\text{SO}_2$ 分子から生成される  $\text{SO}_2^+$ と  $\text{SO}^+$ は  $\text{SO}_2$ 分率に対してほとんど変化していない。

$\text{SO}_2/\text{O}_2$ プラズマでは、中性の原子として O (酸素原子) が、分子として SO (一酸化硫

黄) が解離プロセスにより発生する<sup>29,30,31</sup>。O は、レジストの炭素と反応し、CO あるいは CO<sub>2</sub> の形でレジストから炭素を引き抜く形のエッチング反応を起こす<sup>32</sup>。SO とレジストの炭素とのエッチング反応の経路は見当たらない。図 4-8(a)に SO<sub>2</sub> 分率に対する O と SO の密度を示した。このときレジスト膜のエッチングは行っていない。中性の原子・分子は QMS 内部で電子ビームにより電離させる必要があるが、検出対象となる活性種の QMS 信号は、その活性種が直接電離した成分だけでなく、他の分子からの解離性電離により生成された成分も誤差として含む。そのため QMS 信号を直接電離による生成確率と他の過程による生成確率の比を用いて校正した<sup>29,30,33,34</sup>。また密度の絶対値は親分子との信号の比により校正した。

SO<sub>2</sub> 分率を増やすと SO の密度は増加していくのに対して、O の密度は O<sub>2</sub> の密度とともに減少していく。SO<sub>2</sub> からの O 原子密度への寄与は小さいことがわかる。O と SO の密度は親分子の密度の 7%程度であり、それらの量はかなり多い。SO と O 以外に信号強度が強かった分子は SO<sub>3</sub>(質量数: 80 amu)である。図 4-8(b)に SO<sub>2</sub> 分率に対する SO<sub>3</sub> の信号強度を示した。SO<sub>2</sub> 分率を増やすと SO<sub>3</sub> の信号は大きくなる。SO<sub>3</sub> は SO が酸化されてできる反応の経路は見当たらないが、基底順位の SO<sub>2</sub> と SO<sub>2</sub> のメタステーブルとの間の O 原子の置換反応で生成される反応の経路がある<sup>35</sup>。SO<sub>2</sub> のメタステーブルは基底順位とのエネルギーギャップが小さいため<sup>36</sup>、電子衝突により発生したメタステーブルがプラズマ中に多量に存在している可能性は高いと考えられる。

#### 4. 3. 4 レジストエッチングの反応生成物

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマで ArF レジストをエッチングしているときだけに検出される中性の原子・分子の QMS 信号を、あるいはレジストエッチング前からレジストエッチング中に存在する分子の QMS 信号のエッチングによる増加分をエッチング反応生成物の信号とみなした。

エッチング反応生成物として検出された信号は CO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> である。これらの分子の信号と比べて信号がかなり弱い、OH、H<sub>2</sub>S (あるいは S 原子の同位体; 質量数: 34 amu)、OCS、HS (あるいは S 原子の同位体; 質量数: 33 amu)、CS<sub>2</sub>、そして H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> なども検出された。これらのうち CO と CO<sub>2</sub> の信号強度が大部分を占めた。

図 4-9(a)には、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O の QMS 信号を 600 秒間積算した値を示した。これらの分子はプラズマ中の中性の活性種と同様の方法で絶対値校正された<sup>37,38,39,40,41</sup>。全ての SO<sub>2</sub> 分率の条件でレジスト膜はエッチング時間 600 秒以内に全てエッチングされた。SO<sub>2</sub> 分率を変化させても、CO と CO<sub>2</sub> の積算値はほぼ一定である。O<sub>2</sub> プラズマではレジストの炭素は O と反応して CO と CO<sub>2</sub> ができるが<sup>42</sup>、これらの積算値が SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマで SO<sub>2</sub> 分率に依存しないということは、レジストは O<sub>2</sub> プラズマ同様、主にプラズマ中の O と反応してエッチングされていたのではないかと考えられる。

H<sub>2</sub>O は他の分子に比べてチャンパー壁に吸着し易く、その結果、エッチング後も引き続

き長時間 QMS で観測された。図 4-10 には SO<sub>2</sub> 分率が 10 % のときの CO、CO<sub>2</sub> そして H<sub>2</sub>O の密度 (相対値) のエッチング時間変化を示した。CO、CO<sub>2</sub> の密度はエッチング開始とともに増加してピークに達し、やがてレジスト膜が完全にエッチングされると急激に減少する。それらに対して H<sub>2</sub>O は、CO、CO<sub>2</sub> 分子の信号がピークに達した後でも、ゆっくり信号が増加していき、レジスト膜のエッチングが完了したときピークに達し、そして CO、CO<sub>2</sub> の信号の減衰と比較してより緩やかに減少していく。H<sub>2</sub>O は、もしかしたら発生量は CO、CO<sub>2</sub> に比べると小さいのかもしれないが、チャンバー内に残留し易いので密度が高くなったのではないかと考えられる。

#### 4. 3. 5 レジスト膜表面の化学組成変化

ArF レジスト膜を用いて、SO<sub>2</sub> 分率によるレジスト表面の化学組成の変化を XPS で調べた。分析前、全てのサンプルをアルゴンガスのプラズマで約 15nm スパッタエッチングし、エッチング前のレジスト膜表面のイニシャルの化学組成を分析した。そして 4 つのサンプルを SO<sub>2</sub> 分率 10%、31%、50%、68% で 90 秒間エッチングし、再びレジスト膜表面の化学組成の変化を調べた。90 秒間のエッチングでは、膜厚 243nm のレジスト膜が 15 ~ 85 nm だけエッチングされる。XPS で測定した光電子スペクトルは、C 1s スペクトル (280 eV ~ 295 eV)、O 1s スペクトル (532 eV ~ 533 eV)、そして S 2p スペクトル (160 eV ~ 175 eV) の三つである。XPS 分析での測定深さは化学結合エネルギー 160 から 532 eV の範囲で、2 ~ 3 nm である。したがってレジスト残膜の膜厚は XPS で分析される厚さ (数 nm) に比べて十分厚い。レジストは絶縁物であるので光電子が膜から放出されると表面がチャージアップし、注目するスペクトルの結合エネルギーに誤差が生じる。この誤差は C1s のスペクトルのピークのエネルギー 284.6eV で補正した。

図 4-11 にはエッチング前後の C 1s スペクトルを示した。個々のスペクトルの強度はピーク値で規格化している。SO<sub>2</sub> 分率を変えてエッチングした後のスペクトル波形には特に条件による違いは見られず、どの波形もエッチング前と比べ高エネルギー側のスペクトルが減少するだけである。高エネルギー側のスペクトルは、C-O 結合 (エーテル基 : ether groups : ピーク値 286.1 eV)、C=O 結合 (カルボニル基 : carbonyl groups : ピーク値 287.4 eV)、そして O=C-O 結合 (エステル基 : ester groups : ピーク値 288.8 eV) から成ると考えられるが<sup>43</sup>、C-O 結合以外のピークが存在するエネルギーの信号レベルが小さいことから、エッチング後のレジスト表面では酸素原子はほとんど C-O 結合として存在している。その化学結合状態は SO<sub>2</sub> 分率に対して変化しないこともわかる。エッチング後の C-O 結合が、レジスト膜の元々の炭素骨格の一部なのか、あるいはレジスト表面で酸化されてできたものなのかどうかは、このグラフからは判別できない。

図 4-12 にはエッチング前後の S 2p スペクトルを示した。個々のスペクトルの強度はピーク値で規格化している。エッチング後の S 2p スペクトルでは、SO<sub>3</sub> あるいは SO<sub>4</sub><sup>44</sup> の高次に酸化された硫黄のピークがはっきりと見られる。S (164 eV)、CS<sub>2</sub> (163.7 eV)、C-S

(162.3 eV)に該当するピーク<sup>4,5,46,47</sup>は見えていない。図 4-13 には SO<sub>2</sub>分率による炭素原子数に対する酸素原子数と硫黄原子数の割合を示した(炭素と同じ量なら 1)。ただしこの値はX線による光電子がレジスト膜から真空中に出てこられる深さ 2~3nm の表面層に含まれる割合である。SO<sub>2</sub>分率が高くなると硫黄原子の割合は 0.06 から 0.15 と増加する。酸素原子の割合はエッチングすると増加し、SO<sub>2</sub>分率が高いほど酸素原子の割合は大きい。図 4-11 で炭素原子と酸素原子の結合は SO<sub>2</sub>分率に対してほとんど変化しないのだから、この酸素原子の割合の増加は硫酸化物の酸素原子数の増加によるものと考えられる。SO<sub>3</sub>は、気相中よりも壁に吸着した H<sub>2</sub>O とよく反応して硫酸(sulfuric acid: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 2H<sup>+</sup>)を生成することが知られているが、この硫酸化物は、プラズマ中で観測された SO<sub>3</sub>(図 4-8(b) 参照)と H<sub>2</sub>O(図 4-9(a) 参照)とがリアクター壁面やサンプル表面で反応してできたのではないかと考えられる。

#### 4. 4 考察

SO<sub>2</sub>分率を高くするとエッチングレートの異方性(L/V比、水平/垂直比)が小さくなる理由を考察する。SO<sub>2</sub>分率を上げていくと O<sub>2</sub><sup>+</sup>と O<sup>+</sup>、そして O の密度が大きく減少した。炭素を含むエッチング反応生成物としては CO と CO<sub>2</sub>がかなりの割合を占め、しかも SO<sub>2</sub>分率に対して CO と CO<sub>2</sub>の発生量についての、レジスト膜が完全にエッチングされてなくなるまでの積算値が変化していないことから、SO<sub>2</sub>分率を変えても O とレジストとのエッチング反応は同じ様に起きていたと考えられる。O とレジストのエッチング反応は、必ずしもイオン衝撃を必ずしも必要としない、自発的に起こるエッチング反応であるので、等方的にレジストパターンはエッチングされる<sup>32</sup>。エッチングレートが等方的ということはトリミング量が多いということを意味する。しかしその減少はエッチングレートの異方性の変化には結びつかない。O の密度の減少は単にエッチングレートが減少するだけである。

O<sub>2</sub><sup>+</sup>と O<sup>+</sup>イオンのイオン衝撃の効果が上記のエッチング反応に加わると、より異方的にレジストパターンはエッチングされるため、トリミング量が小さくなっていく。しかし正イオンの密度の減少もエッチングレートの異方性の変化には結びつかない。バイアス電圧が一定の条件下では、プラズマからパターンに来るイオンの運動エネルギーは一定であるので、イオンのレジストパターン側壁へのフラックスとレジスト膜へのフラックスとの割合は変化しないからである。イオンのフラックスの減少も単にエッチングレートが減少するだけである。

レジスト膜表面の硫酸化物の量は炭素原子の数に対する比率で 0.06 から 0.12 に増加した。過去の文献のデータと本研究の硫酸化物の量を比較すると、本研究の硫酸化物の割合はレジストパターン側壁のエッチングレートに影響を与えるのに十分な量である。具体的には、レジストパターンの O<sub>2</sub>プラズマエッチングで SO<sub>2</sub>を添加すると側壁のエッチングレートが無視できるほどの垂直なパターン形状が得られたときの、硫酸化物の炭素原子数に対する割合(炭素原子を 1)は、Z. S. Huang<sup>22</sup>らが SO<sub>2</sub>分率 66%のレジスト膜上で 0.09、

R. S. Hutton<sup>21</sup>らがSO<sub>2</sub>分率60%のレジスト膜上で0.10、そしてC. Monget<sup>23</sup>らがSO<sub>2</sub>分率30%のレジスト膜上で0.16、同じくパターン側壁表面で0.16である。レジストパターンの表面が硫黄酸化物で覆われるとレジストパターンが異方的にエッチングされたということは、硫黄酸化物で覆われた表面のエッチング反応がイオン衝撃を必ず必要とする反応である。すなわち、イオン衝撃によりレジスト表面を被覆していた硫黄酸化物の一部が剥がれてレジスト表面がOに暴露され、その結果Oとレジストが反応してレジストがエッチングされる。そしてパターン側壁ではパターンの底に比べてイオンのフラックスが小さいためエッチングレートが著しく低くなる。

レジスト表面の一部が硫黄酸化物で覆われ、覆われない部分ではOとレジストとの自発的なエッチング反応が、そして覆われた部分では上記のイオン衝撃が必ず必要なエッチング反応が並行して起きていると考え、本研究のエッチングレートの異方性の変化の説明がつく。一方はOとレジスト表面との自発的なエッチング反応であるので等方的なエッチング反応であり、その結果、エッチングレートのL/V比(水平/垂直比)が大きくなるように働く。もう一方はイオン衝撃がレジスト表面を覆っている硫黄酸化物を取り除き、レジストとOとのエッチング反応を可能にする、エッチング反応であるので、異方的なエッチング反応であり、エッチングレートのL/V比が小さくなるように働く。SO<sub>2</sub>分率を高くしていくと、等方的なエッチング成分、すなわちレジストとOとのエッチング反応の成分の寄与が減少していき、逆に、異方的なエッチング成分、すなわちレジスト表面の硫黄酸化物除去にイオン衝撃が必要なエッチング反応の成分の寄与が増加していく。その結果、エッチングレートのL/V比が小さくなっていったのだろう。だが、レジスト表面がさらに完全に硫黄酸化物で覆われ、一方の成分ばかりになると、硫黄酸化物の増加はエッチングレートの異方性の変化には結びつかなくなるだろう。この理由により、図4-6で示したように、SO<sub>2</sub>分率が50%と68%との間でエッチングレートの異方性が変化しなかったのではないかと考えられる。

#### 4. 5 まとめ

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマで、レジストパターンのエッチングレートの異方性(L/V比、水平/垂直比)を測定するとともに、プラズマから生じた正イオン、中性の原子・分子、エッチング反応生成物、そしてレジスト表面の化学組成をIn-situ測定し、SO<sub>2</sub>分率によりレジストパターンのエッチングレートの異方性が変化する理由を考察した。一連の測定のプラズマリアクターは研究用のICPのGECセルを使用した。

SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>プラズマのレジストパターンのエッチングレートのL/V比はSO<sub>2</sub>分率が10%から50%に増加すると減少した。研究用のICPプラズマエッチング装置でも、第2章の商用のエッチング装置と同様の結果が得られるということを確認した。このときバイアス電圧は100V一定である。

SO<sub>2</sub>分率を増加させると、中性のO原子の密度、O<sub>2</sub><sup>+</sup>とO<sup>+</sup>の正イオン密度は大きく減少

した。一方、レジスト表面では  $\text{SO}_2$  分率を増加させると  $\text{SO}_3$  や  $\text{SO}_4$  などの高次に酸化された硫黄酸化物の量が増加した。 $\text{SO}_2$  分率に対して  $\text{CO}$  と  $\text{CO}_2$  の発生量についての、レジスト膜が完全にエッチングされてなくなるまでの積算値が変化していないことから、 $\text{SO}_2$  分率を変えても  $\text{O}$  とレジストとのエッチング反応は同じ様に起きていたと考えられる。

$\text{SO}_2$  分率を高くするとエッチングレートの異方性 ( $L/V$  比、水平/垂直比) が小さくなる理由は、等方的なエッチング反応の成分と異方的なエッチング反応の成分のバランスが  $\text{SO}_2$  分率により変化したからと考えられる。すなわち  $\text{SO}_2$  分率を高くしていくと、等方的なエッチング成分、すなわちレジストと  $\text{O}$  とのエッチング反応の成分の寄与が減少していき、逆に、異方的なエッチング成分、すなわちレジスト表面の硫黄酸化物除去にイオン衝撃が必要なエッチング反応の成分の寄与が増加していき、パターン側壁のエッチングレートが底面のエッチングレートに対して小さくなったと考えられる。

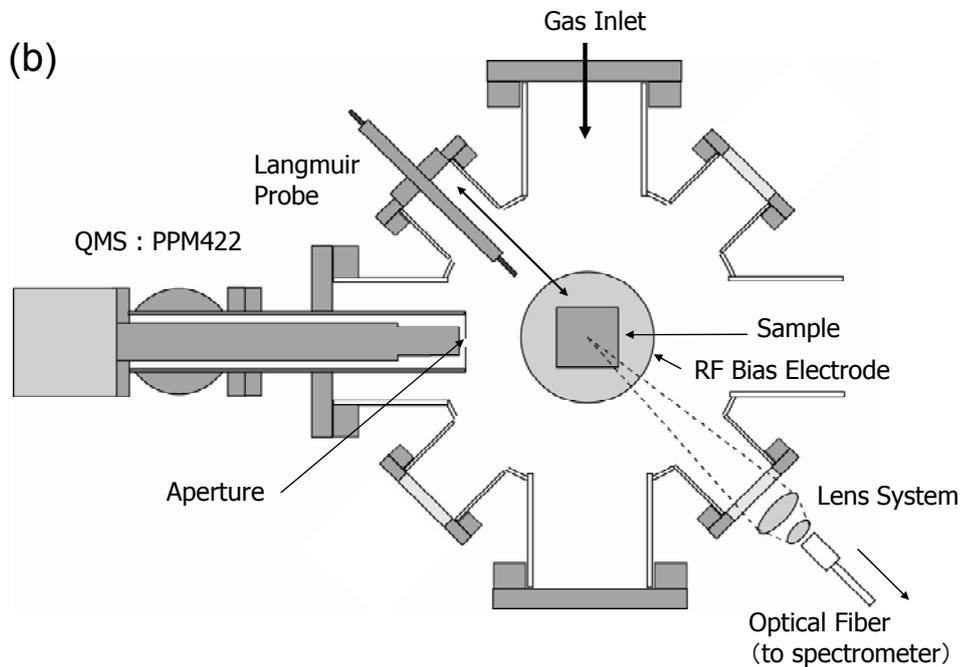
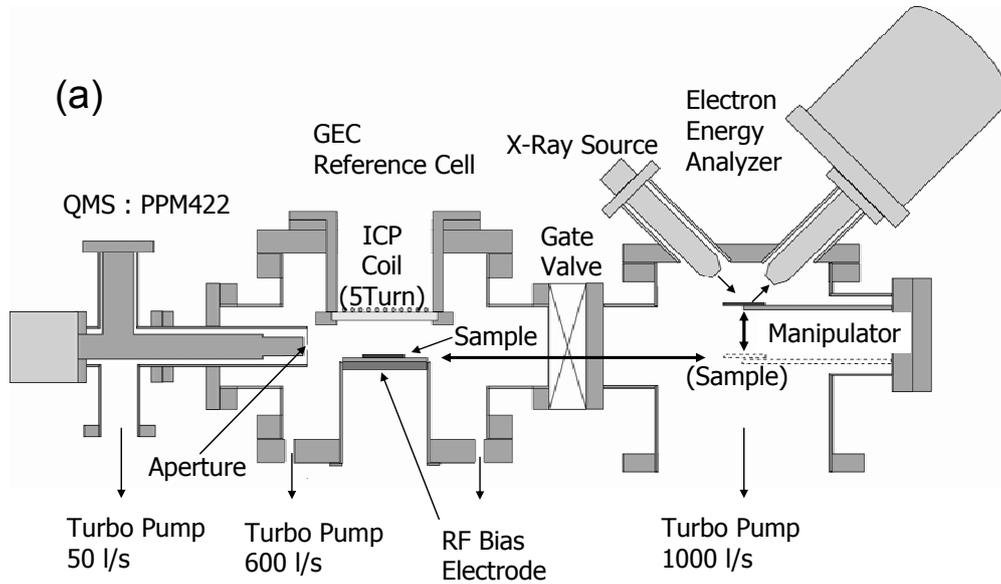


図 4-1：実験装置の概略図。

装置は ICP(誘導結合型)プラズマ GEC セル (GEC Reference Cell) と呼ばれる研究用のプラズマ装置に複数の分析装置をドッキングさせた。(a) 装置全体の側面図。(b) プラズマチャンバーの上面図。

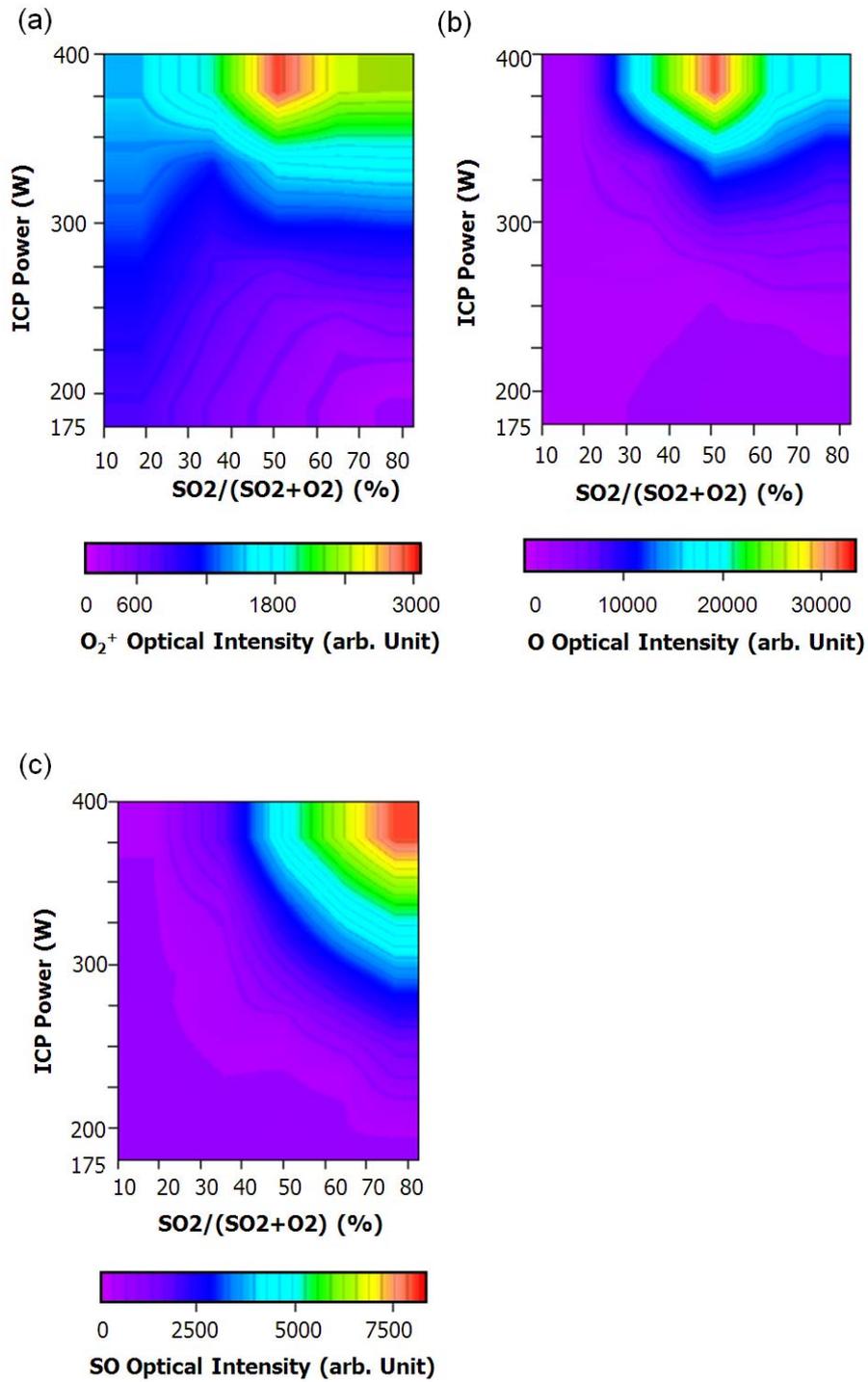


図 4-2 : ICP パワーと  $SO_2$  分率とをマトリクスで変化させたときのプラズマからの発光強度。(a)  $O_2^+(4\Sigma_g \rightarrow 4\Pi_u)$  : 558.0nm、(b)  $O(3p^3P \rightarrow 3s^3S)$  : 844.6nm、(c)  $SO(A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma^-, \text{ for the } (0,0) \text{ band})$  : 263.4nm。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

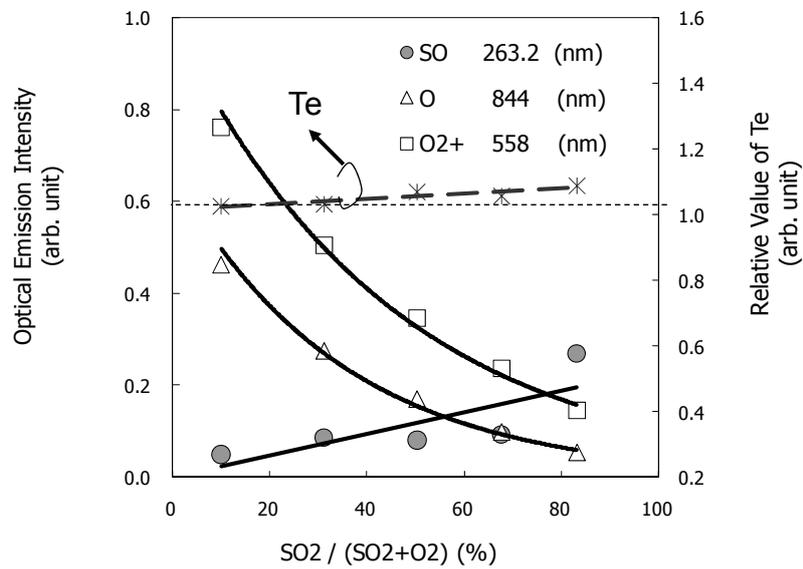


図 4-3 : SO<sub>2</sub>分率による電子温度と発光強度の変化。  
ICP パワー180 W。圧力 30 mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

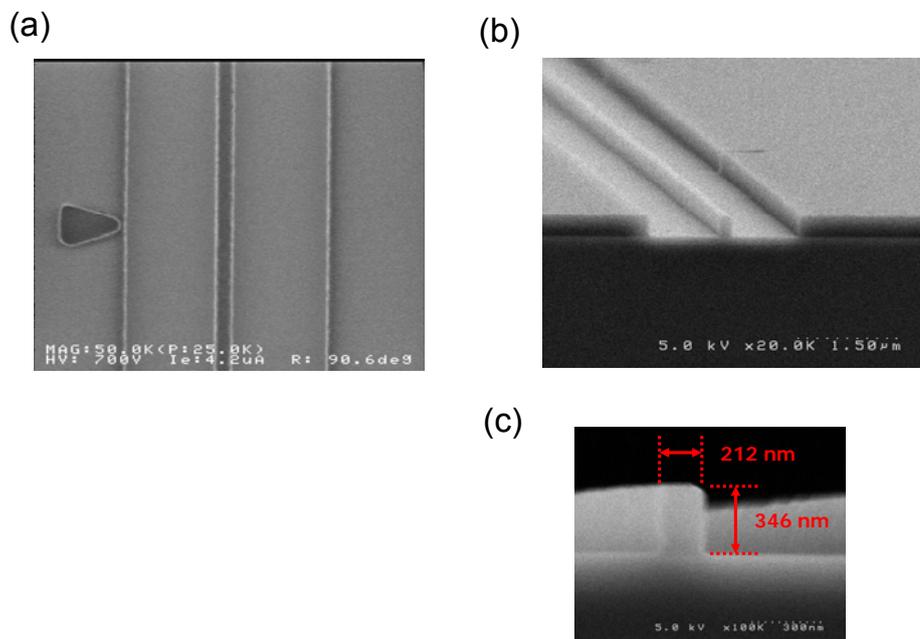


図 4-4 : EBレジストの孤立配置のパターンの写真。  
(a) CD-SEM 写真。(b) 断面 SEM で斜め上からみた写真。(c) 断面 SEM 写真。

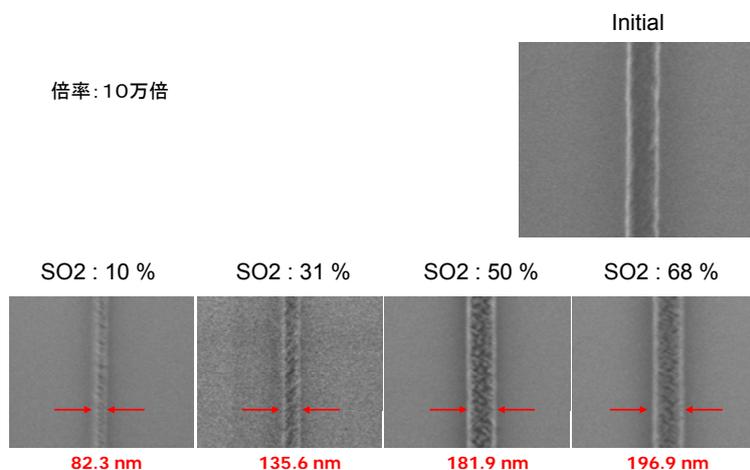


図 4-5 : エッチング前とエッチング後の EB レジストターン CD-SEM 写真。  
 上の Initial 表示の写真がエッチング前。下の 4 つがエッチング後の写真。ICP パワー  
 180W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

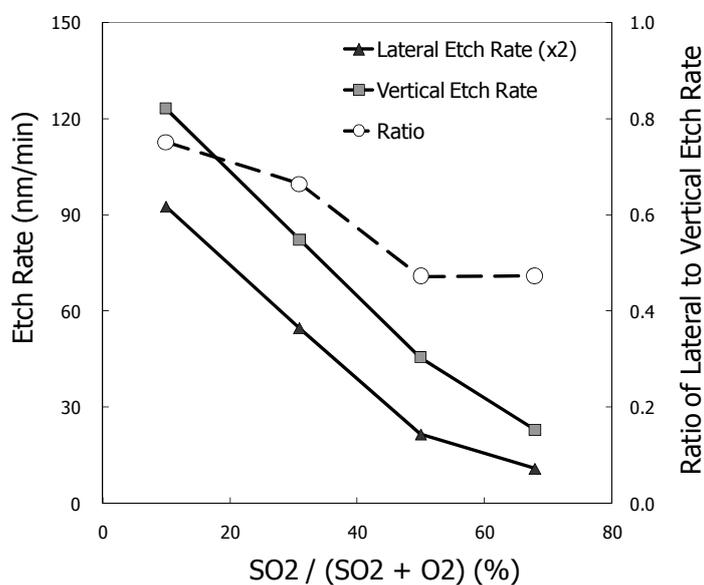


図 4-6 : EB レジストのパターン幅のエッチングレート (Lateral Etch Rate: 水平方向のエ  
 ッチングレートの 2 倍の値) とレジスト膜のエッチングレート (Vertical Etch Rate 垂直  
 方向のエッチングレート)、そしてエッチングレートの L/V 比 (水平/垂直比) の SO<sub>2</sub> 分率  
 依存性。ICP パワー 180W。  
 圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

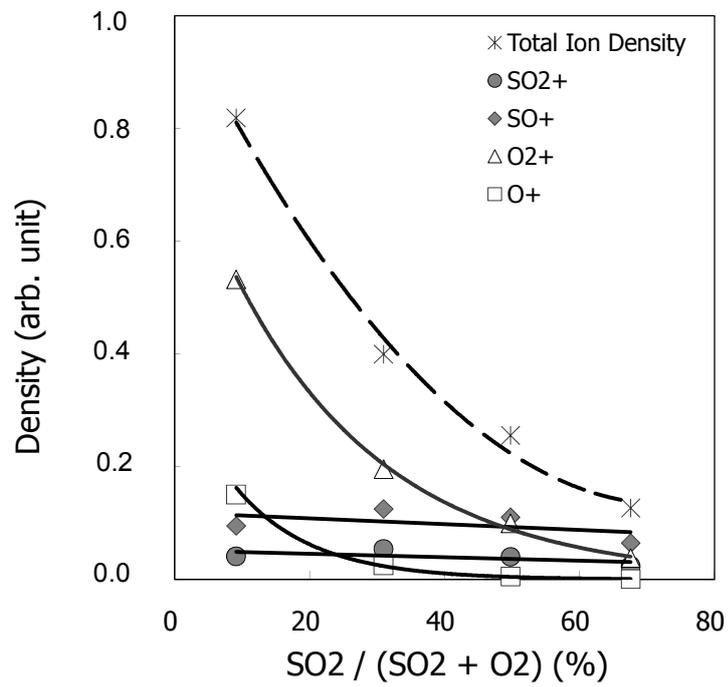


図 4-7: プラズマ中の正イオンの  $\text{SO}_2$  分率に対する変化。  
ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

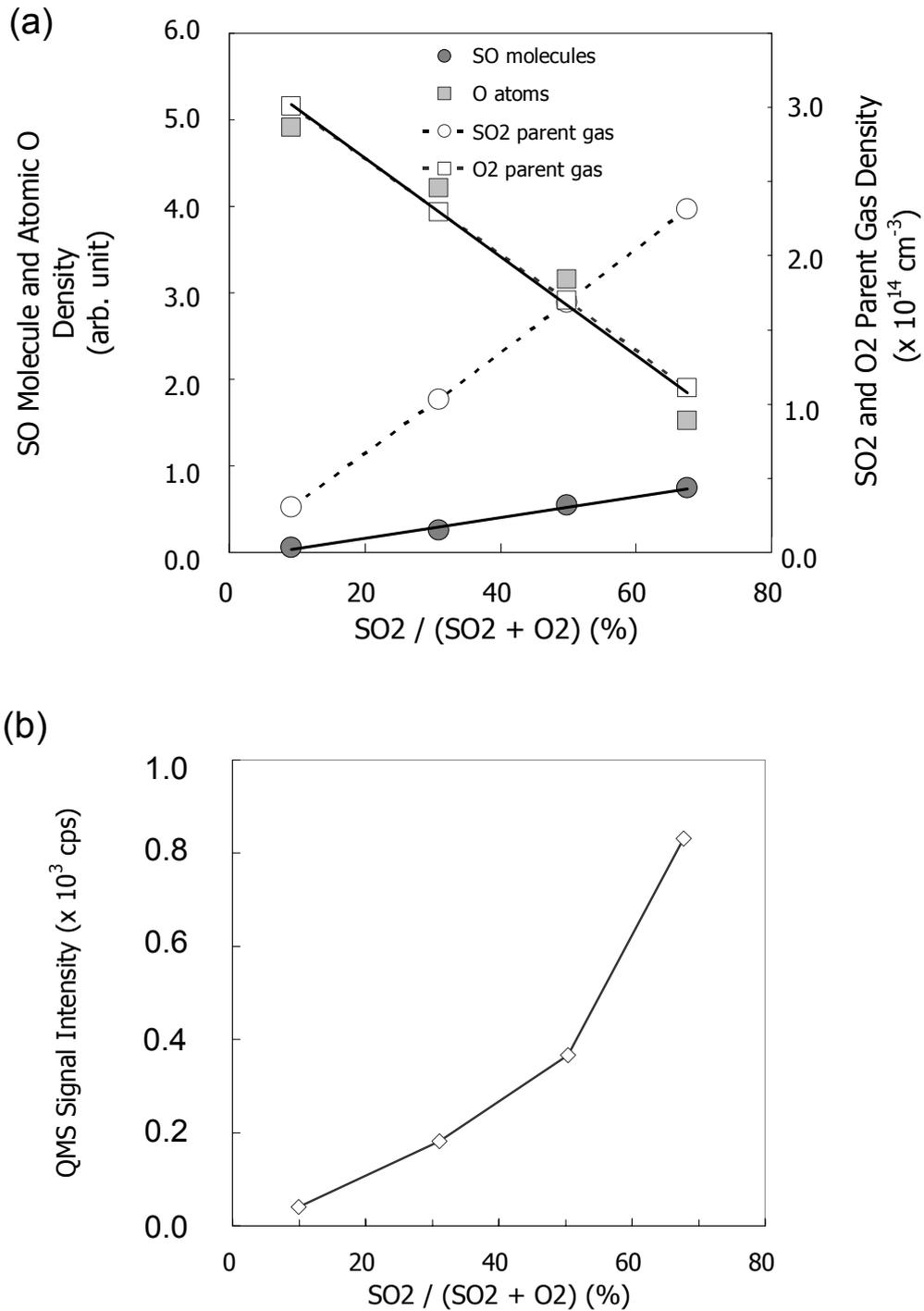


図 4-8 : SO<sub>2</sub>分率による中性の活性種の密度の変化。

(a) SO と O の密度、(b) SO<sub>3</sub> の QMS 信号のグラフ。(a)のグラフには母ガスである SO<sub>2</sub> ガスと O<sub>2</sub> ガスの密度も示した。ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。

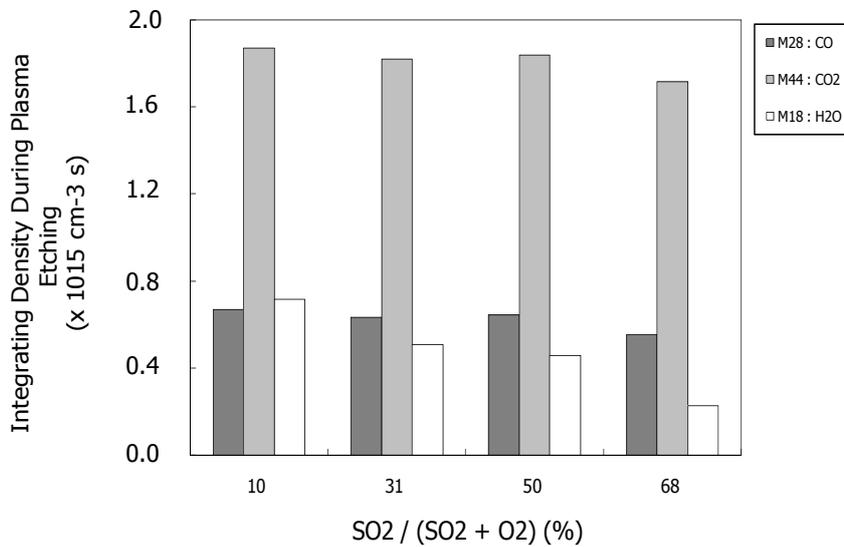


図 4-9 : SO<sub>2</sub>分率による反応生成物(CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O)の密度の変化。

ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。バイアス電圧(Peak-to-peak) は 100V。

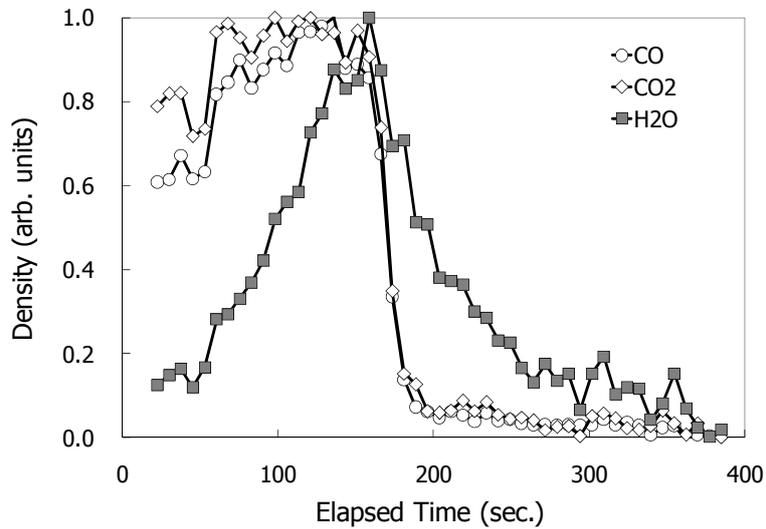


図 4-10 : SO<sub>2</sub>分率が 10 %のときの CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 分子の密度 (相対値) のエッチング時間変化。CO と CO<sub>2</sub>の密度がほぼ減衰したエッチング 200 秒以上でレジスト膜は完全にエッチングされている。ICP パワー180 W。圧力 30 mTorr。He ガスの希釈率は 66%。バイアス電圧 (Peak-to-peak) は 100V。

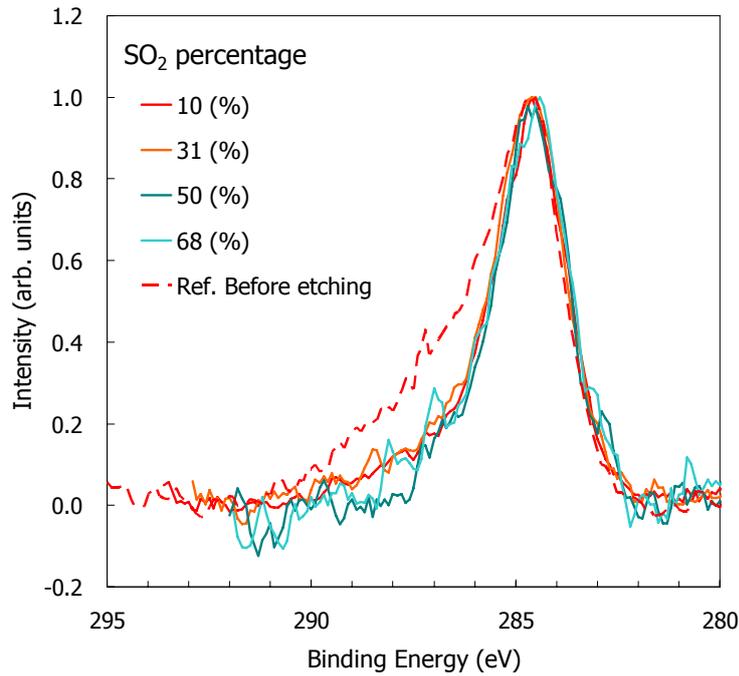


図 4-11：レジスト表面の C 1s スペクトル。

C1s のスペクトルのピークのエネルギーは 284.6eV。ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。  
He ガスの希釈率は 66%。バイアス電圧(Peak-to-peak)は 100V。

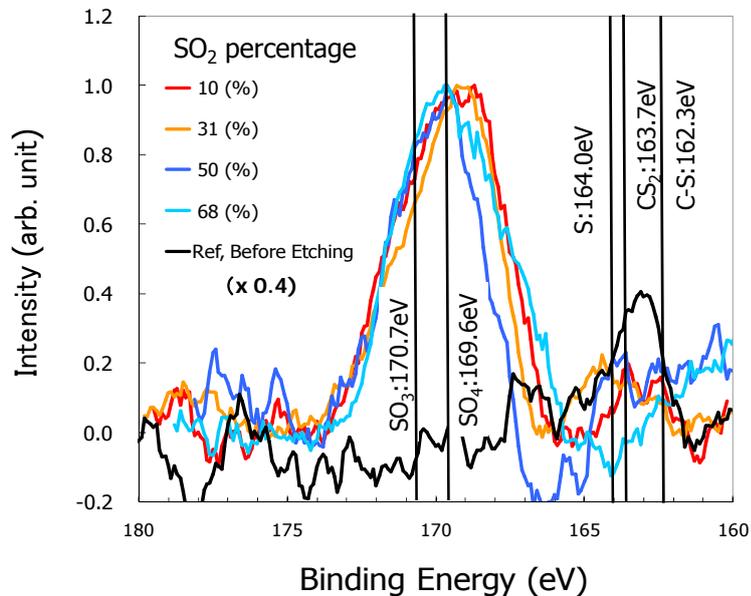


図 4-12：レジスト表面の S2p スペクトル。

ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。バイアス電圧(Peak-to-peak)は 100V。

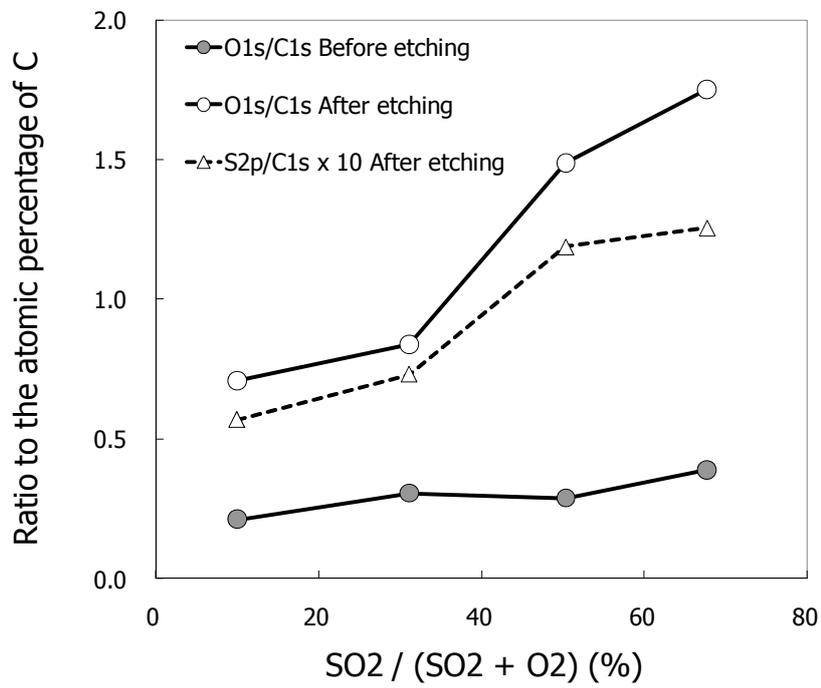


図 4-13：レジスト表面の SO<sub>2</sub> 分率による炭素原子数に対する酸素原子数と硫黄原子数の割合のグラフ。

ICP パワー180 W。圧力 30mTorr。He ガスの希釈率は 66%。バイアス電圧(Peak-to-peak) は 100V。

## 第5章

### プラズマチャージングの In-situ 計測

## 5 プラズマチャージングの In-situ 計測

### 5. 1 序論

1980年代、プラズマを用いたエッチングプロセスのドライ化によりエッチングの転写精度が向上し最小加工寸法が  $1\mu\text{m}$  になった。さらに、1990年代に入り最小加工寸法が  $1\mu\text{m}$  を切るようになると、具体的には hp 350nm、250nm の技術世代になると、プラズマエッチングプロセスで、プラズマチャージングによるゲートパターンのエッチング形状異常とゲート酸化膜のチャージングダメージが問題となるようになった。

プラズマチャージングとは、プラズマに接するシリコン基板上の微細絶縁物パターンの上部が負にチャージアップし、パターンの底に流れ込む電子電流が減少する現象であると考えられている。そしてパターンの底で電子電流が減少した結果、正イオン電流が過剰となってパターンの底が正にチャージアップし、その正のチャージに反発して正イオンの軌道が歪むのではないかと考えられている (図 5-1 参照)。この正イオン軌道の歪みが、ゲートエッチングでゲートラインパターンの根元の部分に切れ込みが入る、ノッチングと呼ばれるゲートのエッチング形状異常を引き起こすのではないかと考えられている。そしてパターンの底での過剰な正イオン電流が配線形成工程のエッチングとコンタクトホール形成工程のエッチングでゲート酸化膜にチャージングダメージを引き起こす。

ゲートのエッチング形状異常は Nozawa らにより初めて報告された<sup>48</sup>。彼らは、密集配置の  $0.5\mu\text{m}$  ライン&スペースのポリシリコンゲートパターン形成工程で、レジスト膜厚が  $1\mu\text{m}$ 、ポリシリコンの膜厚が 300 nm のテストパターンを ECR プラズマエッチング装置の  $\text{Cl}_2$  プラズマでエッチングすると、ゲートパターンの底が完全にエッチングされてゲートパターン同士が孤立した直後、ゲートパターンの根元にノッチングが入ることを報告した。Mevittie らは、Nozawa らのノッチング現象がレジストパターンの局所的なチャージアップにより起きるかどうかをシミュレーションで調査した<sup>49</sup>。Mevittie らの報告では、ノッチング現象は、本来シリコン基板に垂直に入射する正イオンの軌道が負にチャージアップしたゲートパターン側壁に引き寄せられ、パターンの根元付近でシリコン基板に対して横方向に入射することにより引き起こされる、と説明されている。

ゲート酸化膜へのチャージングダメージ現象は、Hashimotoらによって初めて報告された<sup>50</sup>。Hashimotoは、ECRプラズマエッチング装置の  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$  プラズマのアルミ配線エッチングで、ゲート電極からゲート酸化膜を介してシリコン基板に向かって電流が流れた結果生じた、ゲート酸化膜の絶縁性の劣化を報告した (図5-2参照)。ゲート酸化膜に流れた電流の大きさと向きは加速絶縁破壊試験で調べることができる。ゲート酸化膜はある方向に流れた電流の積算値がある値に達すると絶縁破壊に至るが、この絶縁破壊するまでの電流の積算値でゲートに流れた電流の大きさが、そして積算値の符号から電流の向きがわかる。配線形成のエッチングではゲート電極は配線パターンと電気的に接続されていることから、Hashimotoは、プラズマからの電子電流が絶縁物のレジストパターンで遮蔽された結果、レジストパターン底面には過剰な正イオン電流が流れ込んだのではないかと推測し、この現

象を電子遮蔽効果と呼んだ。シリコンプロセスではチップ間にスクライブラインと呼ばれるオープンスペースがあり、その過剰な正イオン電流はプラズマと接するオープンスペースに向かって流れることができる。このゲート酸化膜へのチャージングダメージは、エッチング対象物が導体で、かつそれがゲート酸化膜に電氣的に接続されていれば必ず起こる現象であるが、ゲート酸化膜の面積に対してエッチングパターン面積がより大きな配線工程ではチャージングダメージが他の工程のエッチング（例えばゲートエッチング工程）と比べて顕著に現れる。

ゲートのエッチング形状異常は物理ゲート長のエッチング誤差の主要因である。そしてこれは物理ゲート長のスケーリングによりますます深刻になる可能性があり、回避する方法を確立することは大変重要である。しかし、プラズマチャージング現象自体、すなわちゲートパターンの底でプラズマからの電子電流が減少し、ゲートパターンの底が正にチャージアップすることについて実験では調べられていない。さらにプラズマチャージングの大きさを定量的に評価し、そのプラズマパラメータに対する変化についても調べられていない。これらはプラズマチャージングによるダメージを回避するために必要な知見である。

そこで、プラズマに接する微細な絶縁物トレンチパターンを介して流れたプラズマ電流、そしてパターンの底のフローティング電位、あるいは自己バイアス電位を *in-situ* で計測することにより、プラズマチャージングのメカニズムを調べた<sup>51</sup>。パターンの底でプラズマ電流を測定すれば、プラズマチャージングによる電子電流の減少をダイレクトに測定できる。またパターンの底でのプラズマチャージングによる過剰なイオン電流は、そこでのフローティング電位（あるいは RF バイアスを印加したのであれば自己バイアス電位）をプラスの方向にシフトさせるので、パターンの底の電位のプラスのシフト量（以降、チャージング電圧）を測定すればプラズマチャージングの大きさを評価できる。

本章では、まずプラズマチャージングの *In-situ* 計測方法を述べ、次いでプラズマからの電子電流のアスペクト比依存、そしてアスペクト比、電子温度、RF バイアス電圧によるチャージング電圧の計測結果を示しながらプラズマチャージングのメカニズムを考察する。さらに、シリコンプロセスでプラズマチャージングを回避するための方法を提案する。

## 5. 2 実験装置、実験方法

実験装置と測定系の概略図を図 5-3(a)に示した。プラズマ発生装置として、ICP (Inductively-coupled plasma: 誘導結合型プラズマ)を使用した。その理由は 1990 年代以降、ICP のような高密度プラズマが主流となったからである。ICP のコイルのサイズは直径 500mm であり、コイルに印加した高周波電圧の駆動周波数は 3.4MHz である。プラズマの大きさは、直径 500mm、高さ 200mm である。ガスはサンプルをケミカルにエッチングしないアルゴンガスを使用した。電子温度を振るため、アルゴンガスの圧力を 2mTorr から 40mTorr の範囲で振った。プラズマの下方には、サンプルを載置する基板バイアス電極がある。基板バイアス電極に印加した電源周波数は 13.56MHz である。

プラズマチャージングによるチャージング電圧を In-situ 測定するため、基板電極に載置した SiO<sub>2</sub> 膜のライン&スペースパターン付のシリコンの小片と、オープンスペースパターン付のシリコンの小片とに発生する、二か所の電圧を測定した。オープンスペース付きのシリコンの小片の電位は、無バイアス時では、正イオン電流と電子電流のバランスで決まるフローティング電位となり、バイアス印加時では、バイアス電圧振幅に応じた自己バイアス電位となる。微細パターン付のサンプルの電位はオープンスペースの電位よりも電位がプラズマチャージングによりプラスにシフトする。そのプラスのシフト量を（チャージング電圧）を二つの電位差から測定した。

実験サンプルとサンプルホルダーの構造の概略図を図 5-3(b)に示した。ゲートエッチングのレジストのラインパターンをサンプルとして用いるべきであるが、本研究では実験の都合で（レジストのプラズマ耐性が低いため）SiO<sub>2</sub>（BPSG）膜（シリコン酸化膜）のラインパターンを用いた。シリコン小片（1cm 角、厚さ 0.6mm）の上にメタル（CoSi：コバルトシリサイド）の密着層が形成され、さらに SiO<sub>2</sub>（厚さ 0.5 ミクロン）の酸化膜が形成されている。その酸化膜にオープンスペースパターン（サイズ  $\sqrt{2\text{mm}} \times \sqrt{2\text{mm}}$ 、パターン面積 2mm<sup>2</sup>）またはライン&スペースパターン（サイズ 2mm×2mm、パターン面積 4mm<sup>2</sup>、開口率 50%、L/S 比 1:1（ライン幅 と スペース幅の比））をドライエッチングで形成した。ラインパターン寸法は 5.0 μm から 0.3 μm の間で振った。これはアスペクト比で 0.1 から 1.6 に対応する。サンプルは、厚さ 10 μm のアルミナ皮膜で覆われた基板バイアス電極（材質：アルミ）の上に、サンプルの側面が完全にプラズマから絶縁されるように絶縁体（アルミナ）のカバーで固定された。こうすることでプラズマからの正イオン電流と電子電流は全て酸化膜のライン&スペースパターンエリアを介してのみシリコン基板に流れ込む。サンプルに RF バイアス電圧を印加する場合、アルミナ皮膜だけではシリコン小片と基板電極の間の抵抗が高周波に対して高すぎるため、シリコン小片と基板バイアス電極の間にシャントキャパシタ（20nF）を挿入した。サンプルのシリコン基板の電圧は、被覆銅線でチャンバーの外に引き出してから電圧プローブ（Tektronix P6009）で測定した。またサンプルのシリコン基板に DC 電源でスイープ電圧を印加し、ラングミュアプローブ測定のように I-V カーブを取得できるようにした。このとき電流は、DC 電流が測定可能な、ホール素子を用いたクランプ式の電流計（Tektronix PM503A）で測定した。

プラズマパラメータ（電子密度、電子温度、プラズマ空間電位）はシングルラングミュアプローブ法により測定した。プラズマ空間電位と電子密度をシングルラングミュアプローブの I-V カーブの電子電流の変曲点（inflection point）の電圧値、電流値から求めた。また電子温度は I-V カーブの電子電流の対数微分のフローティング電位からプラズマ空間電位とのグラフの傾きから求めた。図 5-4(a)にラングミュアプローブ測定系の概略図を示した。プローブ先端部分は直径 0.5mm、長さ 8.0mm の白金線である。ICP プラズマでも CCP プラズマ同様、ラングミュアプローブ測定結果に対するプラズマ空間電位の変動の影響は無視することができない。これはコイルからの高周波電力が誘導的にだけでなく、容量的にプ

ラズマに入るからである。プラズマの空間電位が変動するのに対しプローブの電圧が DC 的に DC 電源の設定電圧値に固定されるため、プラズマからプローブに向かって RF 電流が流れて高周波電源の RF 成分がその DC 成分に重畳される。その結果 I-V カーブの傾きが緩やかになり、電子温度が高めに計測される。そこでプローブ先端部分に補償電極を取り付けて、プラズマとプローブチップ間のインピーダンスを低下させ、さらにプローブと電源の間に高周波フィルター（遮断周波数 3.4MHz, 13.56MHz, 27MHz）を挿入した。この補償電極とフィルターにより、プローブ先端部分の電位をプラズマ空間電位の変動にできる限り追従させ、プラズマからの RF 電流を抑制した<sup>5 2,5 3</sup>。補償電極の構造は図 5-4(b)に示した。アルミ電極（直径 10mm、長さ 20mm）の表面に厚さ 10  $\mu$  m のアルミナの膜を成膜してある。補償電極の金属部分とプローブ先端部分は電気的につながっているが、アルミナの皮膜により補償電極を介したプラズマからの DC 電流は流れず RF 電流だけが流れる構造となっている。そのため補償電極はプラズマとプローブとの間の RF 電流に対するインピーダンスだけを低下させることができる。

### 5. 3 実験結果と考察

#### 5. 3. 1 プラズマチャージングによる電子電流の減少とチャージング電圧のアスペクト比依存性

図 5-5 に、ラングミュアプローブの I-V 測定のように、プラズマに接する微細な絶縁物トレンチパターンを介して流れたプラズマ電流を、シリコン基板電圧を振って測定した結果を示す。基板バイアス電極は電気的にフローティング状態とした。プラズマの条件は、ガス圧力 10mTorr、電子温度 3eV、プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$  である。サンプルの電圧が 15V のとき、オープンスペースには約  $600\text{mA/cm}^2$  の電子電流が測定されたが、アスペクト比が高くなるにつれて、電子電流が低下した。具体的な数値では L/S : 5.0  $\mu$  m/5.0  $\mu$  m（アスペクト比 : 0.1）、L/S : 0.5  $\mu$  m/0.5  $\mu$  m（アスペクト比 : 1.0）、L/S : 0.3  $\mu$  m/0.3  $\mu$  m（アスペクト比 : 1.67）の電子電流の値が、各々  $100\text{mA/cm}^2$ 、 $30\text{mA/cm}^2$ 、 $10\text{mA/cm}^2$  である。これまでパターン上部が負にチャージアップしパターンの底で電子電流が減少することが予想されていたが、微細パターン付サンプルの電子電流がオープンスペースよりも減少すること、そしてアスペクト比が高くなると電子電流が小さくなることを初めて実験で確認した。

プラズマチャージングによる電子電流の減少により微細パターン底面では正イオン電流が過剰となる。パターンの底面が電気的にフローティングのときは、底面の電位がプラスにシフトする。図 5-6 に、フローティング電位のアスペクト比依存のグラフをプロット“□”で示した。縦軸のフローティング電位の増加分は、微細パターン付サンプルの電位からオープンスペースの電位を引いた値であり、チャージング電圧に等しい。アスペクト比が大きくなるとパターン底面のフローティング電位（チャージング電圧）は指数関数的に大きくなる。特にアスペクト比が 1.67 では、フローティング電位（チャージング電圧）は 8V まで上昇する。

### 5. 3. 2 パターン側壁の電位

図 5-6 のフローティング電位、すなわちチャージング電圧が上昇したとき、絶縁物のパターン側壁が、どのくらい負にチャージアップしたかどうかを調べるため、図 5-6 の実験データを使って有限要素法 (FEM 法) によるパターン内部の電位分布シミュレーションを行った。

図 5-7(a) にシミュレーションのモデルを示した。アーノルドらのシミュレーション結果<sup>54</sup>を参照し、パターンの上面から  $0.1 \mu\text{m}$  下の幅  $0.05 \mu\text{m}$  の限定された領域のみがマイナスにチャージアップするとして、その場所に電圧:  $V_{\text{sidewall}}$  を与えた。そしてパターンの頭の電圧:  $V_{\text{top}}$  はオープンスペースのフローティング電圧と同じ電圧を与えた。さらにパターン上面からシースに向かって  $10 \mu\text{m}$  上までの空間にパターン上面の電圧:  $V_{\text{top}}$  に等しい電圧  $V_{\text{space}}$  を与えた。このようにシースで電圧一定の分布を与えた理由は、実験の電子温度 約  $3\text{eV}$ 、プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$  の条件でのシースの厚みをシース理論から見積もると約  $100 \mu\text{m}$  であるので、パターンから  $10 \mu\text{m}$  上までの空間では電圧の変化は無視できると考えたからである。

次に、パターン側壁の電圧:  $V_{\text{sidewall}}$  の値の求め方を説明する。図 5-7(b) には、シミュレーションでの定常状態のチャージング電圧の決め方を説明するため、パターンの中心軸上の電子に対する電位分布の二つの極端な場合、すなわち(1) 底の電圧 (底の電圧=基板の電圧)  $V_{\text{substrate}}$  の電圧がパターンの頭の電圧  $V_{\text{top}}$  (=オープンスペースのフローティング電位) と等しいとした場合 ( $V_{\text{substrate}} = V_{\text{top}}$ )、(2)  $V_{\text{substrate}}$  の電圧が  $V_{\text{top}}$  よりも十分低い場合 ( $V_{\text{substrate}} < V_{\text{top}}$ ) の二つの電位分布を模式的に示した。(1)の  $V_{\text{substrate}} = V_{\text{top}}$  場合では、パターン入り口付近に電位の山、すなわち電位障壁が形成される。プラズマ中の電子は、サンプル基板とプラズマとの間に存在するシースを乗り越え、さらにパターン内の電位障壁を乗り越えなければ、パターンの底まで到達することができない。したがって(1)の場合ではパターン底面に流入する電子電流の大きさはイオン電流に対して小さくなってしまふ。一方、(2)  $V_{\text{substrate}} < V_{\text{top}}$  の場合では、(パターンの底がプラスにチャージングしたとき) では、パターンの底からの電界によりパターン入り口付近の電位障壁がなくなる。その結果、プラズマの電子はオープンスペースと同様にパターンの底に流入でき、イオン電流とバランスすることができる。そこで、シミュレーションでは、 $V_{\text{substrate}}$  に  $V_{\text{top}}$  と等しい電圧を与え、徐々に  $V_{\text{substrate}}$  の電圧を増やしていき、電位障壁が図 5-7(b) の(2) のように消滅したら、そのときの  $V_{\text{substrate}}$  の電圧を定常状態のチャージング電圧と決める。この決め方で、パターン側壁の電圧:  $V_{\text{sidewall}}$  の値とアスペクト比を条件として与えてチャージング電圧を計算した、アスペクト比とチャージング電圧の計算値のグラフを、パターン側壁の電圧:  $V_{\text{sidewall}}$  の値をフィッティングパラメータにして、図 5-6 の実験のグラフに  $V_{\text{sidewall}}$  フィッティングさせ、最後に  $V_{\text{sidewall}}$  の値を求めた。

図 5-8 はアスペクト比が 1 ( $L/S : 0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ ) の場合のパターン内部の電位分布のシミュレーション結果である。プラズマ空間電位を  $0\text{V}$  とし、電子温度が  $3\text{eV}$  であるので

オープンスペースのフローティング電位を $-15\text{V}$ - $15.0\text{V}$ とした。このときのパターン側壁の電圧は、 $V_{\text{sidewall}} = -16.38\text{V}$ である。(a)は、 $V_{\text{substrate}} = V_{\text{top}} = -15\text{V}$ とした場合、すなわちチャージング電圧をゼロとした場合であり、パターン入り口に電子に対する電位障壁が存在するのが分かる。(b)は、 $V_{\text{substrate}} = -12\text{V}$ とした場合、すなわちチャージング電圧を $3\text{V}$ とした場合である。(b)のチャージング電圧の値は、測定値の $2.2\text{V}$ に近い値である(図5-6参照)。(b)では、パターン入口の電位障壁がほぼ消滅している。アスペクト比1とそれ以外のアスペクト比のシミュレーションのチャージング電圧の値を図5-6のプロット”■”で示した。シミュレーション結果のチャージング電圧のグラフは実験結果のグラフにはほぼ一致している。したがって図5-7(a)で示した、パターンの側壁が負にチャージアップするシミュレーションモデルは実験結果を十分表現できていることがわかる。

図5-6で示したシミュレーションから計算された側壁の電圧は $V_{\text{sidewall}} = -16.38\text{V}$ である。オープンスペースのフローティング電圧 $-15\text{V}$ - $15.0\text{V}$ と比較すると、その差は $1.38\text{V}$ である。このわずかな差の発生理由は、サンプル基板に対して垂直な方向に方向性を持った正イオンがパターンの頭や底よりもパターン側壁に入射しにくいためであると考えられる。ではパターン側壁でのイオン電流がパターンの頭や底に比べてどのくらい少ないのかを見積もる。パターン側壁の電圧がオープンスペースのフローティング電圧の式と同様に正イオン電流と電子電流のバランスで決まるとすると、パターン側壁の電圧は次の式で表わされる。

$$V_{\text{sidewall}} = -kT_e \ln(I_{\text{es}}/I_i) \quad (5-1)$$

ここで $I_{\text{es}}$ は電子飽和電流、 $I_i$ は正イオン電流、 $kT_e$ は電子温度である。オープンスペースで $I_i$ はイオン飽和電流に等しい。 $V_{\text{sidewall}} = -16.38\text{V}$ を(5-1)式に代入すると、パターン側壁の正イオン電流はイオン飽和電流の $76.1\%$ となり、わずか $23.9\%$ の減少である。この正イオン電流の減少は容易に起こりうると考えられる。

### 5. 3. 3 チャージング電圧の電子温度依存

基板バイアス電極を電氣的にフローティング状態にし、微細パターン付のサンプルのフローティング電位をプラズマの電子温度を振って測定した。電子温度を振るため、アルゴンガスの圧力を変えた。本研究で使用したプラズマチャンバーでは、アルゴンガスの圧力を $40\text{mTorr}$ から $2\text{mTorr}$ の範囲で変えると、電子温度が $2.2\text{eV}$ から $4.0\text{eV}$ の範囲で変化した。圧力を変えると電子密度も変化してしまうため、ガス圧力による電子密度の増減をICP電力の増減により補償して、電子密度の値を $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 一定に維持させた。またプラズマ空間電位がチャンバーのアース部分を基準に決まっているため、電子温度を変化させるとプラズマの空間電位も変化する。そこでラングミュアプローブで測定したプラズマの空間電位でフローティング電位を補正した。

図5-9に電子温度による微細パターン付サンプルの補正後のフローティング電位を示した。ここで補正後のフローティング電位は、サンプルのフローティング電位からプラズマの空間電位を引いた値である。微細パターンの寸法は、 $L/S: 1.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$  (アスペクト比:

0.5)、L/S : 0.5  $\mu$  m/0.5  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.0)、L/S : 0.4  $\mu$  m/0.4  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.25) である。微細パターン底面のフローティング電位は、電子温度が高いほど、よりマイナスにシフトしていくが、アスペクト比が 0.5、1.0、1.25 と大きくなるにつれて、フローティング電位の電子温度に対する傾きは緩くなるのがわかる。

上記の理由は以下のように説明できると考えられるプラズマに接した絶縁物表面の電位は正イオン電流と電子電流のバランスで決まる。電子温度が上昇すると、電子がパターンの底に到達し易くなるため、過渡的に電子電流が正イオン電流に対して過剰となり、やがて絶縁物表面の電位はマイナスにシフトし、両電流がバランスしたところで定常状態に達する。絶縁物のパターンでは、電子温度が上昇すると、パターンの頭だけでなく、パターン側壁の電位も、よりマイナスにシフトしていく。パターン側壁の電位がよりマイナスになれば、パターン入口にできる電子に対する電位障壁が高くなっていく。この電位障壁が高くなることで電子がパターン底面に到達しにくくなることと、電子温度の上昇により電子がパターンの底に到達し易くなるのが、互いに相殺され、結果として、電子温度の増加の影響をパターンの底のフローティング電位が受けにくくなったのである。

電子温度が高いほどフローティング電位の電子温度に対する傾きが緩くなるため、その結果チャージング電圧の値は大きくなっていく。図 5-8 を見ると、電子温度が 2eV のときは、L/S : 0.5  $\mu$  m/0.5  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.0)、L/S : 0.4  $\mu$  m/0.4  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.25) の電位と、ほぼオープンスペースに近い L/S : 1.0  $\mu$  m/1.0  $\mu$  m (アスペクト比 : 0.5) の電位との差、すなわちチャージング電圧が 0.5V であったのが、電子温度が 3eV のときは、各々、2V、2.5V となる。そして電子温度 4eV では、各々、2.1V、3.5V となる。

ところで、パターン側壁の電位のマイナスへのシフトは、電子温度の上昇によるパターン側壁での正イオン電流の減少によっても生じると考えることもできる。電子温度が増加するとシース電圧が増加し、シースで加速されるパターンへの入射正イオンの方向性がよりパターンの底に向かうようになる。その結果、パターン側壁に到達する正イオンの数が電子の数に対して減少し、(5-1)式でからわかるようにパターン側壁の電位がマイナスにシフトし、最終的にチャージング電圧が上昇する。では、電子温度が上昇してパターン側壁がよりマイナスになるのは、パターン側壁での電子電流の増加、あるいは、正イオン電流の減少の、どちらの寄与が大きいのか考察する。アルゴンイオンの場合、電子温度が 2eV 増加するとイオンエネルギーは 10eV 増加すると見積もられる。図 5-10 の自己バイアス電圧による自己バイアス電位差(=主に正イオンの入射エネルギーによるチャージング電圧)のグラフから、自己バイアス電圧(サンプルに入射する正イオンの平均エネルギーに等しい)が 10V 増加しても、チャージング電圧は 0.66V しか増加していない。一方、図 5-8 を見ると、L/S : 0.5  $\mu$  m/0.5  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.0)、L/S : 0.4  $\mu$  m/0.4  $\mu$  m (アスペクト比 : 1.25) の電位と、ほぼオープンスペースに近い L/S : 1.0  $\mu$  m/1.0  $\mu$  m (アスペクト比 : 0.5) の電位との差は、電子温度 2eV $\rightarrow$ 4eV の増加で、各々、0.5V  $\rightarrow$  2.1V、0.5V  $\rightarrow$  2.5V であり、したがってチャージング電圧は 1.5V から 2V の増加である。したがって、電子温度によるチャージング電

圧の増加は（パターン側壁の電位のマイナスへのシフトの原因は）、主にパターン側壁での電子電流の増加によるものである。

#### 5. 3. 4 チャージング電圧のイオンエネルギー依存

シリコンプロセスのイオンアシストエッチングでは、少なくとも 100V 以上の高いエネルギーのイオン衝撃が必要であるため、シリコン基板を載置した電極に高周波電力(RF バイアス電圧)を印加する。入射イオンのエネルギーが高くなると、微細パターン側壁の電位がマイナスにシフトする。なぜならば入射イオンエネルギーが高いほど、正イオンの方向性が基板に垂直な方向に揃い、パターン側壁に到達する正イオンの数が電子の数と比べて減少するからである。

図 5-10 に、RF バイアス電圧振幅 (DC 自己バイアス電圧) による、異なる二つの微細寸法を持つサンプル間の自己バイアス電圧の差を示した。ここで、縦軸の値は、微細パターンの寸法  $L/S : 1.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$  (アスペクト比 : 0.5) と  $L/S : 0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$  (アスペクト比 : 1.0) との間の自己バイアス電圧の差である。その自己バイアス電圧の差はアスペクト比 : 1.0 の微細パターンのチャージング電圧の値に等しい。その理由は以下のとおりである。アルゴンガスの圧力は 10mTorr で、電子温度は 3eV である。自己バイアス電圧  $V_{DC}$  は以下の式で表される<sup>55</sup>。

$$V_{DC} \cong V_f + \frac{V_{rf}}{2} \quad (5-2)$$

ここで、 $V_{rf}$  はシリコン基板に印加された RF バイアスの電圧振幅であり、 $V_f$  はシリコン基板でのフローティング電圧である。二つのサンプルの RF バイアスの電圧振幅が等しければ、自己バイアス電圧の差はフローティング電位の差である。さらに図 5-5 に示されるようにアスペクト比 : 0.5 の微細パターンとサンプルのオープンスペースとの電位差はゼロであるので、したがって図 5-10 の縦軸の自己バイアス電圧の差はアスペクト比 : 1.0 の微細パターンのチャージング電圧に等しい。

さて図 5-10 から、RF バイアス電圧振幅 300V の増加に対して（自己バイアス電圧 150V に対して）、チャージング電圧は約 10V 増加したことがわかる。RF バイアス電圧を印加しないときは図 5-9 より 2V であるから、RF バイアス電圧印加時のチャージング電圧は基板フローティング時に比べて著しく大きくなることがわかる。

基板バイアス電極に高周波電力を印加すれば、基板電極近辺で電子温度が上昇する<sup>56</sup>。5.3.3 節で電子温度の増加によるチャージング電圧の増加を考察したので、ここでも RF バイアス電圧による電子温度の増加のチャージング電圧増加への寄与の程度を考察する。図 5-11 はシングルラングミュアプローブで測定した電極近辺の電子温度である。RF バイアス電圧が大きいほど、そして基板電極に近いほど測定された電子温度の値が大きいことから、シース加熱による電子温度の増加を観測したと考えられる<sup>57</sup>。基板バイアス電極から 10mm 離れた空間での電子温度は RF バイアス電圧振幅 0V ~ 300V で 3eV ~ 5.5eV の範囲

で変化することがわかる。アルゴンガス圧力 10mTorr での電子の平均自由行程は約 40mm であることから、サンプル近傍でも基板バイアス電極から 10mm 離れた空間の電子温度の値とそれほど変わらないだろうと考えられる。

図 5-10 に電子温度だけの増加によりチャージング電圧（自己バイアス電圧差）が変化すると仮定した場合のグラフをプロット“■”で示した。これらの値は、図 5-8 のフローティングの電位差から見積もった値である。電子温度だけの増加によりチャージング電圧が変化したと仮定して見積もったチャージング電圧の値は、実験の測定値よりもはるかに小さい。したがってチャージング電圧の増加は主に RF バイアス電圧によるイオンエネルギーの増加によると結論できる。

図 5-10 のグラフでは、RF バイアス電圧振幅が大きければ大きいほど、チャージング電圧は高くなるように見える。さらに RF バイアス電圧振幅を大きくしていったときのチャージング電圧を測定した。図 5-12(a)はホールの密集パターン付サンプルの自己バイアス電位の RF バイアス電圧依存である<sup>58</sup>。絶縁物層の膜厚は 2.0 μm であり、アスペクト比（酸化膜厚 / 直径）は 2、4.4、8 の三種類である。オープンスペースの自己バイアス電位は RF バイアス電圧振幅に比例して下がっていく。自己バイアス電圧が大きくなるからである。一方、微細パターン付のサンプルの自己バイアス電位は、RF バイアス電圧振幅(Peak-to-peak)が 200V まで変化せず、RF バイアス電圧振幅が 200V を越えると RF バイアス電圧にほぼ比例して下がっていく。したがって図 5-12(b)の微細パターン付サンプルとオープンスペースのサンプルとの自己バイアス電位の差（チャージング電圧）<sup>58</sup>で示されるように、チャージング電圧は、初め RF バイアス電圧振幅に比例して増加するが、やがて RF バイアス電圧振幅に対して飽和する。

ただし、チャージング電圧の飽和値は 100V 程度となっているが、この値は過大に測定されている。なぜならばパターンを通して流れるイオン電流の値が電圧プローブに流れる電流よりも少なすぎたからである。ホールパターンの領域面積は 1mm<sup>2</sup>であり、開口率は 1.2% しかない。測定したプラズマ密度からイオン電流密度は mA/cm<sup>2</sup> オーダーと見積もられるが、ここでイオン電流密度を 1 mA/cm<sup>2</sup> とすると 100V の自己バイアス電圧がかかった場合、ホールの部分の抵抗は 100MΩ となる。使用した電圧プローブの内部抵抗は 10MΩ であるから、ホールの部分の抵抗はプローブの内部抵抗よりも 1 ケタ大きい。したがって二つの抵抗の比から、実際のチャージング電圧は 100V ではなくて、その 1/10 の 10V 程度と見積もられる。

#### 5. 4 まとめ

プラズマに接する微細な絶縁物トレンチパターンを介して流れたプラズマからの電流、そして微細パターン底面のフローティング電位、自己バイアス電位を in-situ で計測し、プラズマチャージング現象を解析した。

微細な絶縁物トレンチパターンをプラズマに曝すと、プラズマから微細パターンの底へと

流れる電子電流がパターンの中でオープンスペースよりも減少すること、そして、アスペクト比が高くなるにつれてイオン電流に対して電子電流が小さくなり、微細パターンの底のオープンスペースに対するフローティング電位（チャージング電圧）が増加することを実験で初めて明らかにした。

パターン側壁が負にチャージアップし、パターン入り口に電位障壁が形成されるというモデルを仮定すると、チャージング電圧のアスペクト比依存をシミュレーションで忠実に再現できることを明らかにした。また、チャージング電圧の実験値を用いて見積もったパターン側壁の電位の値はオープンスペースの電位よりも 1.38V 低い値であり、その値はイオン電流がオープンスペースよりも 24%低いだけで容易に発生する値であることを示した。

さらにチャージング電圧は電子温度の増加に対して増加することを明らかにした。この増加の理由は主として電子温度の増加によりパターン側壁の電位がよりマイナスにシフトしたからであると考えられる。また RF バイアス電圧を大きくするとチャージング電圧が増加することも明らかにした。この増加は、パターンに入射する正イオンの方向性がシリコン基板に垂直な方向に揃って、パターン側壁に到達する正イオン電流が電子電流に比べて低下し、その結果パターン側壁の電位がマイナスにシフトしたことが主な原因であると考えられる。

以上のプラズマチャージングのアスペクト比依存、電子温度依存、RF バイアス電圧依存の結果から、プラズマチャージングの効果を緩和する最も有効な手段は電子温度を下げることでありと結論できる。なぜならば、将来の微細化の進展を考慮すれば、アスペクト比を低くするプロセスインテグレーションは困難であり、RF バイアス電圧もエッチングレートを稼ぐため、転写精度を上げるため下げるわけにはいかないからである。電子温度には高い調整の自由度がある。電子温度を下げるには、本実験で行ったようにガス圧力を上げる、あるいは電子に対する衝突断面積の大きい原子量、分子量の大きい反応に寄与しないガス（例えばクリプトン、キセノンなど）を使えば容易に実現可能である。

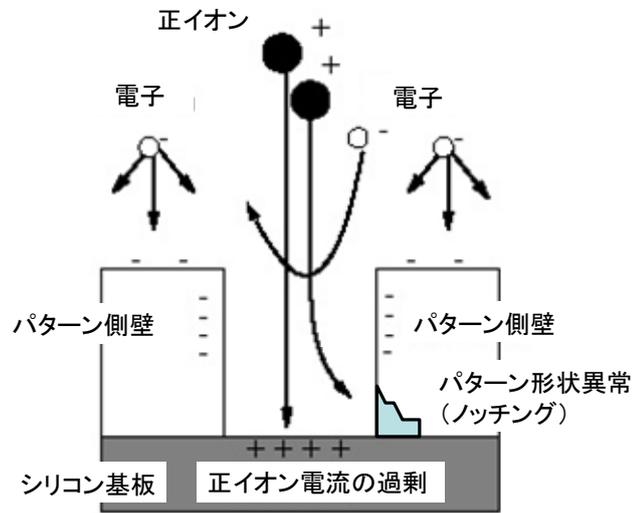


図 5-1：プラズマチャージングによるゲートパターンのエッチング形状異常。

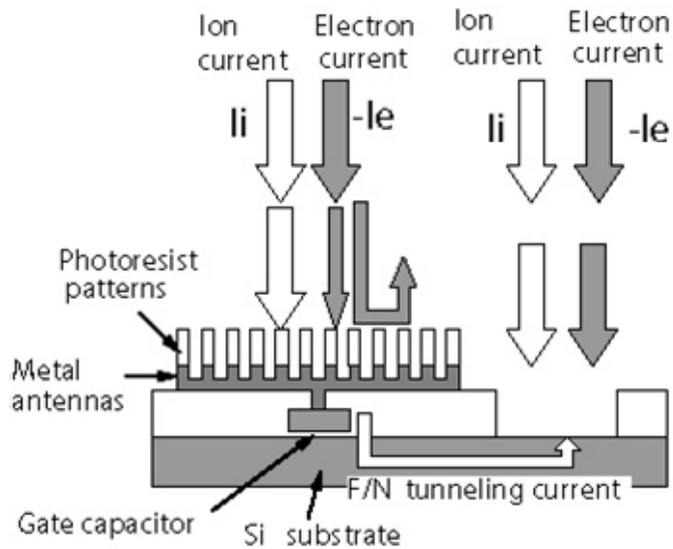


図 5-2：プラズマチャージングによるゲート酸化膜へのチャージングダメージ。

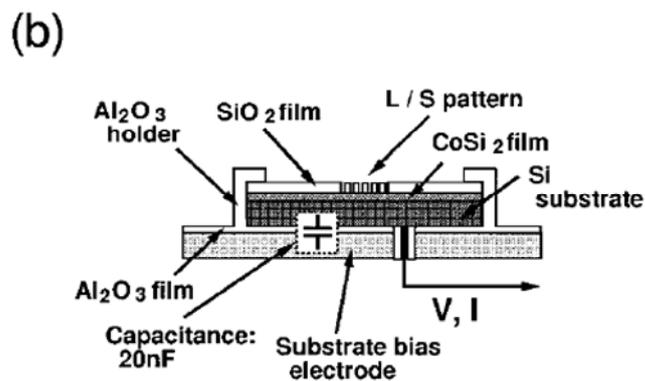
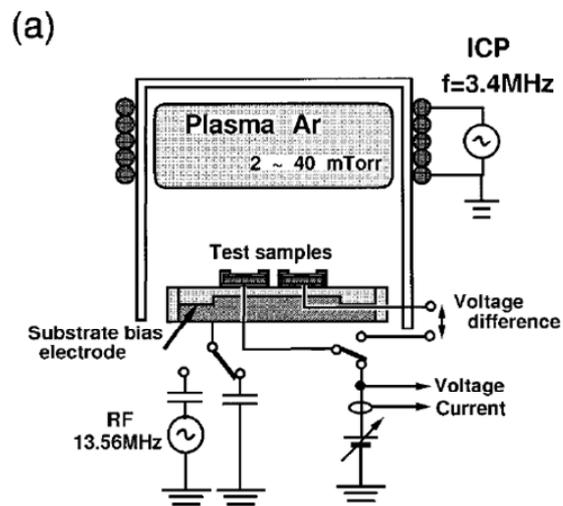
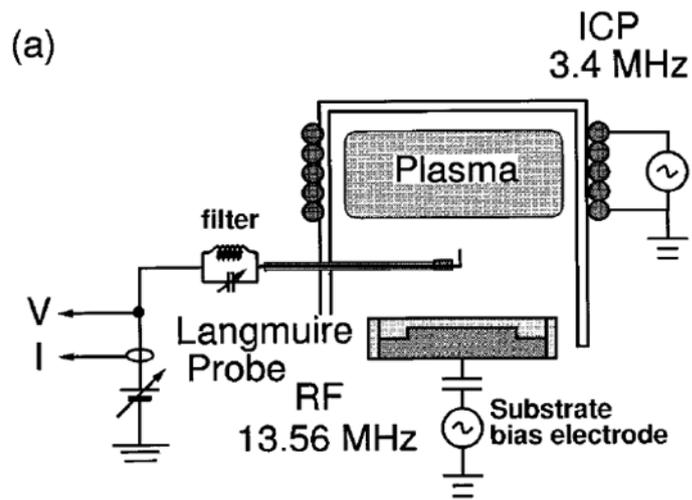


図 5-3：実験装置、測定系、そして実験サンプルの概略図。

(a) 実験装置全体。(b) 実験サンプルとサンプルホルダーの概略図。サンプルは微細な絶縁物のトレンチパターンが形成されている。



(b)

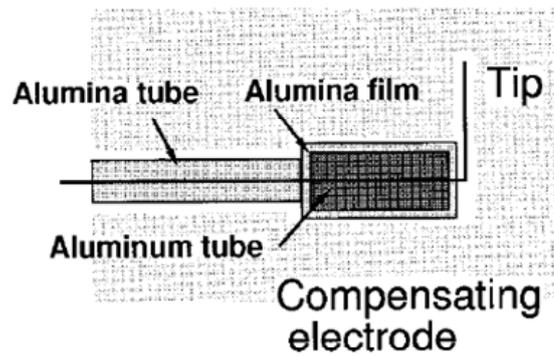


図 5-4：ラングミュアプローブの概略図。

(a) ラングミュアプローブ測定系の概略図。(b) プローブ先端部分の補償電極の構造の概略図。

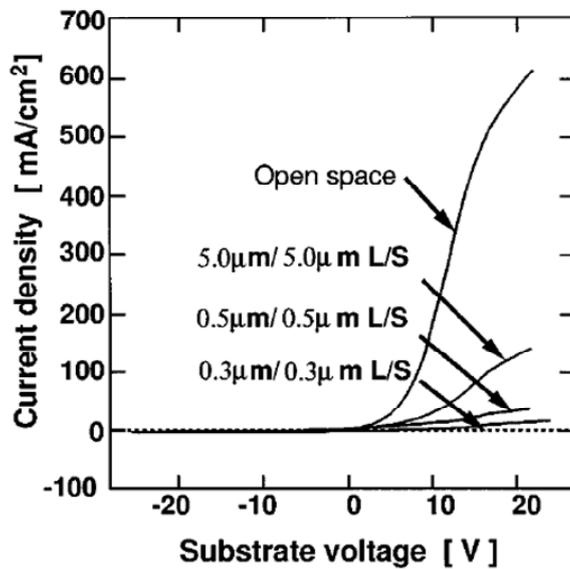


図 5-5：プラズマに接する微細な絶縁物トレンチパターンを介して流れたプラズマ電流のシリコン基板電圧依存のグラフ。

Ar のガス圧力 10mTorr、電子温度 約 3eV、プラズマ密度 10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup>

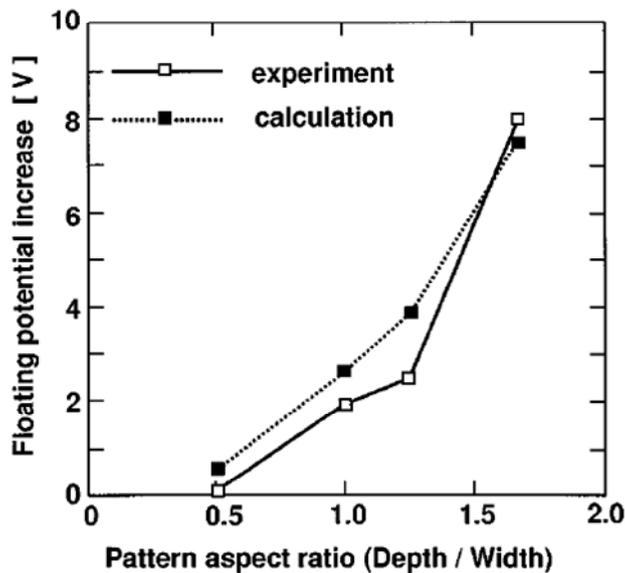


図 5-6：微細な絶縁物トレンチパターンのアスペクト比によるパターンの底のフローティング電位の増加分（チャージング電圧）の実測値（プロット“□”）。

縦軸の電位の基準はオープンスペースのフローティング電位。実験条件は図 5-5 と同じ。

合わせて、図 5-7 のモデルで計算したフローティング電位の値も示した（プロット“■”）。

$$V_{\text{sidewall}} = -16.38\text{V}$$

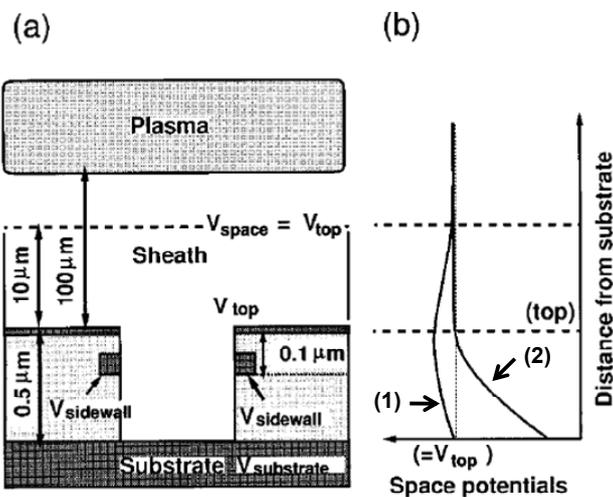


図 5-7 : (a) 有限要素法 (FEM 法) によるパターン内部の電位分布シミュレーションモデル。(b) パターンの中心軸上の電子に対する電位分布 (模式図)。  
 図(b)の(1) は底の電圧 (底面の電圧=基板の電圧)  $V_{\text{substrate}}$  の電圧がパターンの頭の電圧  $V_{\text{top}}$  (=オープンスペースのフローティング電位) と等しいとした場合( $V_{\text{substrate}} = V_{\text{top}}$ )、  
 (2)は $V_{\text{substrate}}$  の電圧が $V_{\text{top}}$  よりも低い場合( $V_{\text{substrate}} < V_{\text{top}}$ )である。

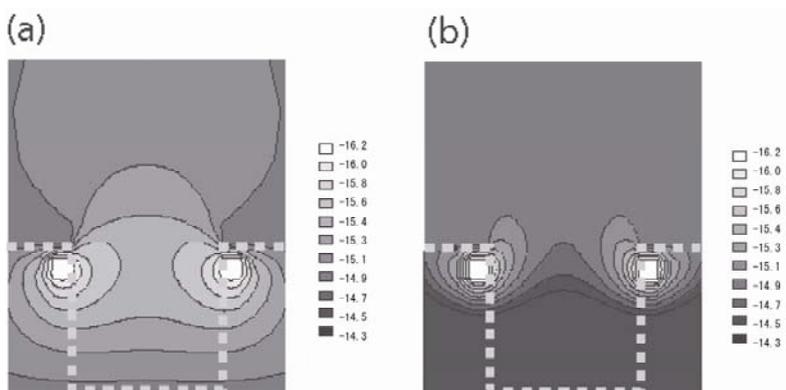


図 5-8 : 図 5-7 のシミュレーションモデルを使って計算されたパターン内部の電位分布。アスペクト比は 1 ( $L/S : 0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ )。電子温度は  $3\text{eV}$ 。  $V_{\text{sidewall}} = -16.38\text{V}$ 。(a)は、 $V_{\text{substrate}} = V_{\text{top}} = -15\text{V}$ とした場合、すなわちチャージング電圧をゼロとした場合である。(b)は、 $V_{\text{substrate}} = -12\text{V}$ とした場合、すなわちチャージング電圧を  $3\text{V}$ とした場合である。

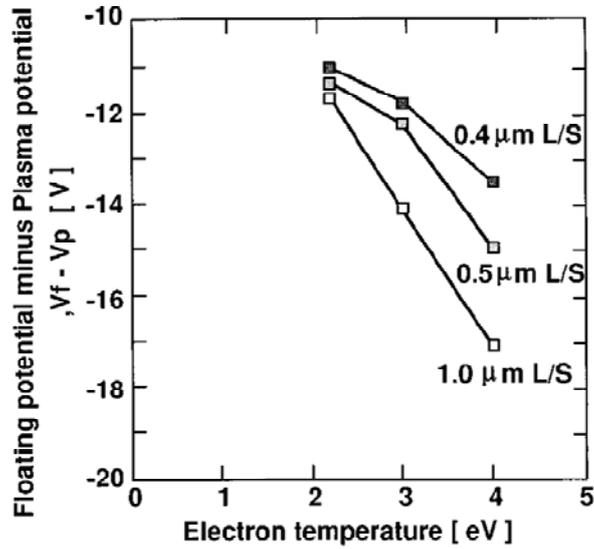


図 5-9：電子温度による微細パターン付サンプルの補正後のフローティング電位。  
補正後のフローティング電位とは、サンプルのフローティング電位からプラズマの空間電位を引いた値である。圧力 2.5 ~ 40mTorr。プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$

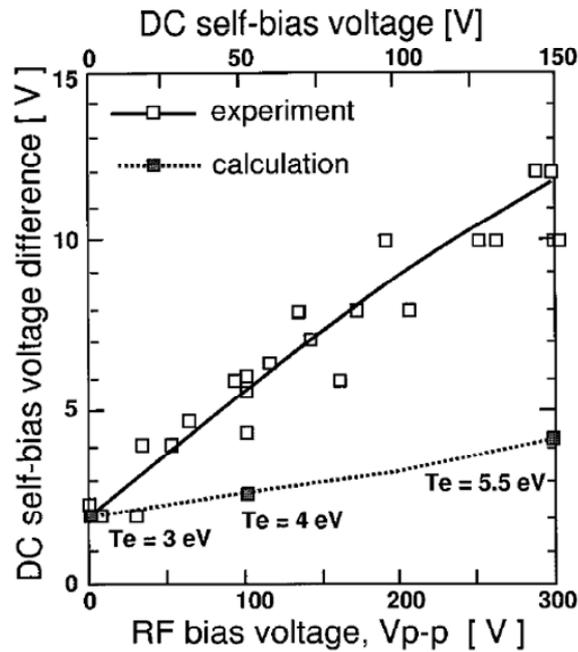


図 5-10：RF バイアス電圧振幅による二つの微細パターンの自己バイアス電圧の差 (=チャージング電圧)。  
縦軸は、微細パターンの寸法 L/S :  $1.0\mu\text{m}/1.0\mu\text{m}$  (アスペクト比 : 0.5) と L/S :  $0.5\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$  (アスペクト比 : 1.0) との間の自己バイアス電圧の差である。圧力 10mTorr。プラズマ密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$ 。

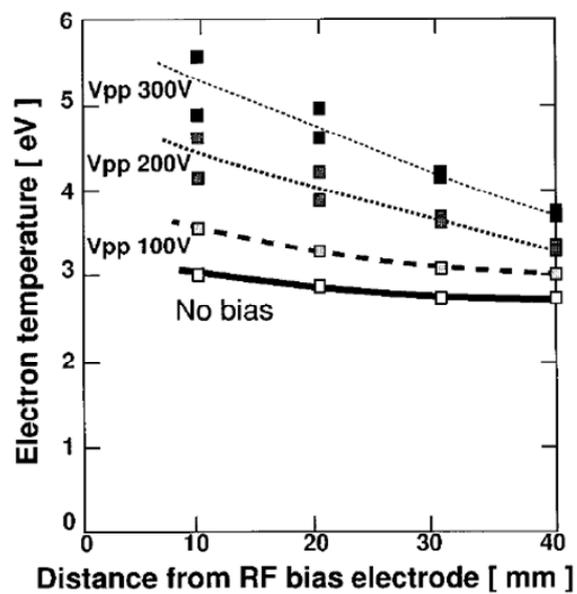


図 5-11： シングルラングミュアプローブで測定した電極近辺の電子温度。  
RF バイアス電圧振幅(peak-to-peak)を 100V から 300V まで変化させた。  
条件は図 5-10 と同じ。

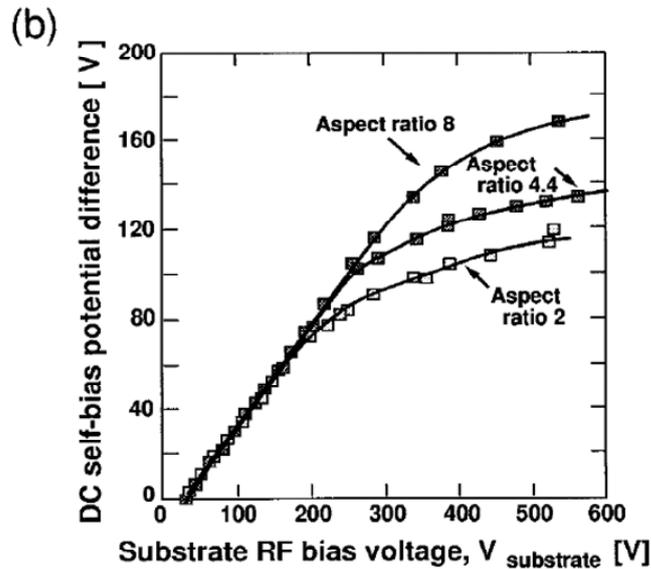
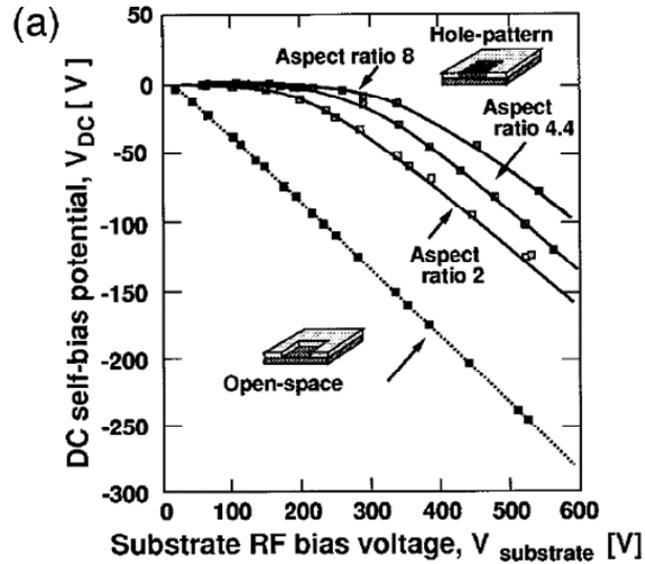


図 5-12 : (a) 微細パターン付サンプルの自己バイアス電位の RF バイアス電圧依存。(b) 微細パターン付サンプルとオープンスペースのサンプルとの自己バイアス電位の差(チャージング電圧)の RF バイアス電圧依存。  
 サンプルの微細パターンはホールの密集パターンである。サンプルの酸化膜厚は  $2.0 \mu\text{m}$ 、アスペクト比(酸化膜厚 / 直径)は 2、4.4、8 の三種類である。その他の条件は図 5-10 と同じ。

## 第6章

### 結論

## 6 結論

物理ゲート長 50nm 以下のトランジスタの速度性能を向上させながら高い製造歩留まりを確保するためには、物理ゲート長をフォトレジストパターンの寸法を超えて微細化する技術とともに、トランジスタの物理ゲート長の加工精度を向上させる技術が必要となっている。本研究では、ArF エキシマレーザー光（波長：193 nm）を露光源としたリソグラフィーのレジスト（パターン幅：80 nm）を用いた、hp 90nm の技術世代のゲート長 40 nm のトランジスタのゲートエッチング加工における、トランジスタの物理ゲート長の加工精度を向上させることを目的とした。

具体的には、次の二つの課題を解決するための研究を行った。第一に、物理ゲート長 50nm 以下のトランジスタの量産ラインで、レジストパターンをリソグラフィーの最小加工寸法を超えて微細化するだけでなく、物理ゲート長のロット間のランダムなばらつき、そしてレジストトリミングに起因する疎密パターン間のトリミング量の差によるシステムティックな物理ゲート長のばらつきを解決することである。第二に、物理ゲート長のエッチング誤差の主要因の一つである、ゲートのエッチング形状異常を回避するために必要な、プラズマチャージングのメカニズムを明らかにすることである。第 2 章から第 4 章は、第一の課題を解決するために行った研究についての内容であり、第 5 章は、第二の課題を解決するために行った研究についての内容である。

第 2 章では、トリミング量がパターン疎密に依存しない、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術を開発した。本技術では、SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合比によりポリシリコントランジスタの最終物理ゲート長をレンジで 12nm の範囲で調整することが可能である。しかも孤立配置のパターンと密集配置のパターンとの間のエッチングバイアスの疎密差の変動のレンジは、2nm（±1nm）以下である。ここでエッチングバイアスはリソグラフィー後レジストパターン幅からポリシリコンの最終の物理ゲート長を引いた値である。SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのエッチングバイアスの疎密差がなくなる理由は、メインエッチングで、SO<sub>2</sub> を O<sub>2</sub> ガスに添加することにより孤立配置のパターンのトリミング量が密集配置のパターンの値に対して大きく改善されたこと、そしてオーバーエッチング時間を調整すればメインエッチングで生じたトリミング量の差を解消できたからである。

第 3 章では、第 2 章の SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマのレジストトリミング技術を使った、アドバンスドプロセスコントロール（APC）技術を開発した。実際のトランジスタの量産ラインで期間 6 ヶ月、実験ロット数 73 ロットでの APC の加工精度の検証実験を行った結果、物理ゲート長のランダムなばらつきは  $1\sigma=3.85\text{nm}$ 、そして物理ゲート長のねらい値の ±1nm 以内に収まるロットの割合は 92% となり、加工の精密度の目標値  $1\sigma=4.00\text{nm}$  と正確度の目標値 90% 以上を達成した。また物理ゲート長のシステムティックなばらつきの原因となる、レジストトリミングに起因する疎密パターン間のエッチングバイアスの差もほぼ ±1nm 以内に抑制した。このとき APC の制御モデルのプロセス変動による誤差は、持続予測法によ

りパイロットウェハのエッチングバイアスをフィードバックして補償した。検証実験を解析した結果、APC システムの全体の誤差には制御モデルのエッチングバイアスの誤差、すなわちフィードバックの予測誤差が大半を占めること、そして APC システム全体の誤差を小さくするためにはフィードバックでの予測のリードタイムを短くするのが有効であることを明らかにした。

第 4 章では、 $\text{SO}_2/\text{O}_2$  プラズマでレジストパターンがトリミングされる理由を考察するため、レジストパターンのエッチングレートの異方性 (L/V 比、水平/垂直比) を測定するとともに、プラズマから生じた正イオン、中性の原子・分子、エッチング反応生成物、そしてレジスト表面の化学組成を In-situ 測定した。 $\text{SO}_2$  分率 ( $= \text{SO}_2/(\text{SO}_2+\text{O}_2)$ ) を増加させると、中性の O 原子の密度、 $\text{O}_2^+$  と  $\text{O}^+$  の正イオン密度は大きく減少した。一方、レジスト表面では  $\text{SO}_2$  分率を増加させると  $\text{SO}_3$  や  $\text{SO}_4$  などの高次に酸化された硫黄酸化物の量が増加した。 $\text{SO}_2$  分率を高くしていくと、等方的なエッチング成分、すなわちレジストと O とのエッチング反応の成分の寄与が減少していき、逆に、異方的なエッチング成分、すなわちレジスト表面の硫黄酸化物除去にイオン衝撃が必要なエッチング反応の成分の寄与が増加していき、その結果パターン側壁のエッチングレートが変化しレジストパターンがトリミングされていったと考えられる。

第 5 章では、プラズマに接する微細な絶縁物トレンチパターンを介して流れたプラズマからの電流、そして微細パターン底面のフローティング電位、自己バイアス電位を in-situ で計測し、プラズマチャージング現象を解析した。微細な絶縁物トレンチパターンをプラズマに曝すと、プラズマから微細パターンの底へと流れる電子電流がパターンの底でオープンスペースよりも減少すること、そして、アスペクト比が高くなるにつれてイオン電流に対して電子電流が小さくなり、微細パターンの底のオープンスペースに対するフローティング電位 (チャージング電圧) が増加することを実験で初めて明らかにした。そしてパターン側壁が負にチャージアップし、パターン入り口に電位障壁が形成されるというモデルを仮定すると、チャージング電圧のアスペクト比依存をシミュレーションで忠実に再現できることを明らかにした。さらにチャージング電圧は電子温度の増加に対して増加すること、そして RF バイアス電圧を大きくするとチャージング電圧が増加することも明らかにした。以上の実験結果から、プラズマチャージングの効果を緩和する最も有効な手段は、比較的調整の自由度の高い電子温度を下げることであると考えられる。

## [本研究に関連した発表]

### 1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- (1) T. K. Goto and T. Makabe, “Evaluation of Errors in Feedback Control Based on Persistence Prediction in Model-Based Process Controller System for Deep Sub-100 nm Gate Fabrication”, Jpn. J. Appl. Phys. 45(10A), pp.7645-7654 (2006).  
(第2章、第3章の原著論文)
- (2) T. Kamata\* and H. Arimoto, “Charge build-up in Si-processing plasma caused by electron shading effect”, J. Appl. Phys. 80(5), pp.2637-2642 (1996).  
(第5章の原著論文)
- (3) T. Kamata\* and H. Arimoto, “Suppression of electron shading effect by a counter radio frequency bias in plasma etching”, J. Vac. Sci. Technol B 14(6), pp.3688-3691 (1996).  
(第5章の原著論文)
- (4) T. K. Goto and T. Makabe, “Measurement of Amount of Pattern-Trim and Surface Chemistry for Organic Resist Etching in an Inductively Coupled Plasma in SO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Gas Mixtures”, Jpn. J. Appl. Phys. 46(8A), (Accepted for publication).  
(第4章の原著論文)

\*旧姓 Takeshi Kamata, 1998年改姓

### 2. 国際会議

- (1) T.Kamata\*, “Charge build-up in plasma caused by electron shading effect”, IUVESTA Workshop: Plasma Sources and Surface Interactions in Materials Processing, 18-21 July, 1995.
- (2) T. Kamata\*, “Suppression of electron shading effect by a counter radio frequency bias in plasma etching”, EIPEN 40<sup>th</sup> International Conference, 29-31 May, 1996.
- (3) T. Kamata\*, “Suppression of Charge Build-up due to Electron Shading Effect by a Counter RF Bias in Plasma Etching”, 3<sup>rd</sup> International Conference on Reactive Plasmas, Nara, Japan 21-24 January, 1997.
- (4) T. K. Goto, “Behavior of particles released from inner walls in an ECR etch tool”, 2<sup>nd</sup> International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Hakone, Japan 24-28 May, 1999.
- (5) T. K. Goto, “A new method for measuring the electron temperature in Si Plasma etching (I)”, 54<sup>th</sup> Annual Gasous electrons conference, Pennsylvania, 2001.

(6) T. K. Goto, "A new method for measuring the electron temperature in Si Plasma etching (II)", 16<sup>th</sup> Europhysics Conference on Atomic & Molecular Physics of Ionized Gases, Grenoble, 2002.

(7) T. K. Goto, "Advanced process control for 40nm Gate fabrication", International Symposium on Semiconductor Manufacturing, San Jose, California, 30 September- 2 October, 2003.

(8) T. K. Goto, "Advanced process control for deep sub-100nm gate fabrication", SPIE 30<sup>th</sup> International Symposium Microlithography, 27 February - 4 March 2005.

(9) T. K. Goto, "Advanced process control for deep sub-100nm gate fabrication", 6<sup>th</sup> European Advanced Equipment Control / Advanced Process Control Conference, 4 -6 April, 2005.

\*旧姓 Takeshi Kamata, 1998 年改姓

### 3. 国内発表

(1) 日刊工業新聞 平成 15 年(2003), 10 月 1 日付, p.1, "40 ナノメートルのゲート電極 パターン依存せず 1 ナノメートル精度で量産"。

(2) 電子情報通信学会誌 Vol.87, No.3, 2004, "40nm CMOS トランジスタゲート電極のアドバンスドプロセスコントロール技術"、技術解説。

(3) 後藤 剛, "40 ナノメートル以降のゲートトランジスタ加工におけるアドバンスドプロセスコントロール"、LSI テスティングシンポジウム, 平成 16 年 11 月 10-12 日, 大阪。

### 4. 関連特許

(1) US Patent 5,846,885 "Plasma treatment method"

(第 5 章の関連特許)

(2) US Patent 7,172,972, "Semiconductor device manufacture method and etching system"

(第 2 章、3 章の関連特許)

## [謝辞]

本論文を作成するにあたり、慶応義塾大学理工学部 真壁利明教授、黒田忠広教授、津田裕之教授、中野誠彦准教授には、本論文の審査をして下さるとともに、内容に関し貴重なご指示を頂き、ここに感謝の意を表します。

本研究を行うにあたり、9年間に渡り直接ご指導頂きました真壁利明教授には重ねて心から感謝の意を表します。

さらに本研究を遂行するにあたり、協力して下さった、富士通研究所の堀内敬氏、有本宏氏、岡秀樹氏、東北大学田中徹准教授に感謝いたします。また真壁研究室のOB、学生の皆様にも感謝いたします。

---

## [参考文献]

- <sup>1</sup> S. W. Butler, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 13, p.1817 (1995).
- <sup>2</sup> S. Ruegsegger (IEEE Trans. On Semiconductor Manufacturing, Vol. 12, No. 4, p.493 (1999).
- <sup>3</sup> G. P. Kota, J. Luque, V. Vahedi, A. Khathuria, T. Dziura, and A. Levy, Proceedings of SPIE Vol. 5044 (2003), p.90.
- <sup>4</sup> M. Nagase and K. Tokashiki, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, Vol. 17 (2004), p. 281.
- <sup>5</sup> C. El Chemali, J. Freudenberg, M. Hankinson, W. Collison and T. Ni, J. Vac. Sci. Technol. B 21 (2003), p. 2304.
- <sup>6</sup> S. Xu, Z. Sun, X. Qian, J. Holland and D. Podlesnik, J. Vac. Sci. Technol. B 19 (2001), p.166.
- <sup>7</sup> P. I. Klimecky, J.W. Grizzle and F. L. Terry, Jr., J. Vac. Sci. Technol. A 21 (2003), p.706.
- <sup>8</sup> G. P. Kota, J. Luque, V. Vahedi, A. Khathuria, T. Dziura, and A. Levy, Proceedings of SPIE Vol. 5044 (2003), p. 90.
- <sup>9</sup> C. Monget and O. Joubert, J. Vac. Sci. Technol. B 17(4), p. 1406, (1999).
- <sup>10</sup> Takeshi K. Goto, M. Tajima, H. Arimoto, and F. Harada, Proceedings. ISSM2003, p.115-117, San Jose, California.
- <sup>11</sup> ポリシリコンのエッチングに関連する文献として、L. Desvoires, L. Vallier, and O. Joubert, J. Vac. Sci. Technol. B 18, (2000), p. 156.を挙げる。
- <sup>12</sup> エッチングする前に、処理ウェハを基板電極に静電的に吸着して固定するために、給電用のプラズマ(Heのみ、40mTorr)を約5秒間、ウェハに照射する。そしてエッチング終了後、再び、除電用のプラズマ(Heのみ、40nmTorr)を、約5秒間、ウェハに照射する。このプラズマによりレジストパターンの幅が3nm~10nm程度、縮小する。
- <sup>13</sup>波長193nmのArFレーザーによる露光のため(液侵ではない)、1回だけの露光で幅80nmゲートパターンは作成できない。まず1回目の露光で、写真のL字型の部分に相当する、レジスト幅130nmのパターンを形成し、さらに、図2-5の2万倍の写真の点線で囲んだ部分を二重に露光し、レジスト幅80nmのレジストパターンを形成する。
- <sup>14</sup> A. Habermas, D. Hong, M. Ross, and W. Liversay, Proceedings of SPIE Vol. 4589 (2002), p. 92.
- <sup>15</sup> S. Xu, Z. Sun, X. Qian, J. Holland and D. Podlesnik, J. Vac. Sci. Technol. B 19 (2001), p.166.
- <sup>16</sup> P. I. Klimecky, J.W. Grizzle and F. L. Terry, Jr., J. Vac. Sci. Technol. A 21 (2003), p.706.
- <sup>17</sup> International Technology Roadmap for Semiconductors edited by Semiconductor Industry Association (2001).
- <sup>18</sup> W. H. Press et al.:*Numerical Recipes in C*(Cambridge University Press, 1988 1992), Chap. 15, p. 656.
- <sup>19</sup>ゲート寸法の正確な値を公表することに関して富士通から許可されなかったため横軸は指標となる値からの偏差で表示してあります。
- <sup>20</sup> M. Pons, J. Pelletier, and O. Joubert, J. Appl. Phys. 75, 4709 (1994).
- <sup>21</sup> R. S. Hutton, C. H. Boyce, and G. N. Taylor, J. Vac. Sci. Technol. B13, 2366 (1995).
- <sup>22</sup> Z. S. Huang, Y. Melaku and W. Nguyen, Jpn. J. Appl. Phys. 37, 2373 (1998).
- <sup>23</sup> C. Monget and O. Joubert, J. Vac. Sci. Technol. B17, 1406 (1999).
- <sup>24</sup> P. A. Miller et al., J. Natl. Int. Standard. Technol. 100, 427 (1995).
- <sup>25</sup> E. Meeks et al., J. Vac. Sci. Technol. A16, 2227 (1998).
- <sup>26</sup> B. R. Soller, R. F. Shuman, and R. R. Ross, J. Electrochemical.Soc, 131, 1353 (1984).

- 
- <sup>27</sup> R. E. Walkup, K. L. Saenger, and G. S. Selwyn, *J. Chem. Phys.* 84, 2668 (1986).
- <sup>28</sup> J M Ajello, K. Geoffrey, and I. Kanik, *J. Geophys. Res.* 97, 10501 (1992).
- <sup>29</sup> R. Basner, M. Schmidt, H. Deutsch, V. Tamovsky, A. Levin and K. Becker, *J. Chem. Phys.* 103(1), 211 (1995).
- <sup>30</sup> Y. Itikawa et al., *J. Phys. Chem. Ref. Data* 18, 23 (1989).
- <sup>31</sup> E. Krishnakumar, S. V. K. Kumar, S. A. Rangwala, and S. K. Mitra, *Phys. Rev. A* 56, 1945 (1997).
- <sup>32</sup> O. Joubert, J. Pelletier, and T. Arnal, *J. Appl. Phys.* 65 , 5096 (1989).
- <sup>33</sup> V.Tamovsky, A. levin, H. Deutsch and K. Becker, *J. Chem. Phys.* 102, 770 (1995).
- <sup>34</sup> E Brook, M. F. A. Harrison and A. C. H. Smith, *J. Phys. B* 11, 3115 (1978).
- <sup>35</sup> S. Okuda, T. N. Rao, D. H. Slater, and J. G. Calvert, *J. Phys. Chem.* 73, 4412 (1969)
- <sup>36</sup> H. D. Mettee, *J. Chem. Phys.* 49, 1784 (1968).
- <sup>37</sup> Y. Itikawa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 31(3), 749 (2002).
- <sup>38</sup> C. Tian and C. R. Vidal, *J. Phys. B* 31, 895 (1998).
- <sup>39</sup> D. Rapp, P. Englander-Golden and D. D. Briglla, *J. Chem. Phys.* 42(12), 4081 (1965).
- <sup>40</sup> D. Rapp and P. Englander-Golden, *J. Chem. Phys.* 43(5), 1464 (1965).
- <sup>41</sup> O. J. Orient and S. K. Srivastava, *J. Phys. B* 20, 3923 (1987).
- <sup>42</sup> M. A. Hartney, W. M. Greene, D. S. Soane, and D. W. Hess, *J. Vac. Sci. Technol. B* 6, 1892 (1988).
- <sup>43</sup> J. S. Brinen, S. Greenhouse, and L. Pinatti, *Surf. Interface Anal.*, 17, 63 (1991).
- <sup>44</sup> Wren A.G., Phillips R.W., Tolentino C.U., . *Colloid Interface Sci.* 70, 544 (1979).
- <sup>45</sup> Lindberg B.J., Hamrin K., Johansson G., Gelius U., Fahlmann A., Nordling C., Siegbahn K., *Phys. Scripta* 1, 286 (1970).
- <sup>46</sup> Yu X.-R., Liu F., Wang Z.-Y., Chen Y., *J. Electron Spectrosc. Relat. Phemon.* 50, 159 (1990).
- <sup>47</sup> Clarke T.A., Rizkalla E.N., *Chem. Phys. Lett.* 37, 523 (1976).
- <sup>48</sup> Nozawa *et al.*, in *Proceedings of Dry Process Symposium*, p. 37, (1994).
- <sup>49</sup> Takashi Kinoshita, Masami Hane, and James P. McVittie *J. Vac. Sci. Technol. B* 14(1), p.560, (1996).
- <sup>50</sup> K. Hashimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33, p. 6013 , (1994).
- <sup>51</sup> T. Kamata and H. Arimoto, *J. Appl. Phys.* 80(5), p.2637, (1996).
- <sup>52</sup> A. P. Paranjpe, J. P. McVittie, and S. A. Self, *J. Appl. Phys.* 67, p. 6718, (1990).
- <sup>53</sup> P. A. Chatterton, J. A. Rees, W. L. Wu, and K. Al-Assadi, *Vacuum* 42, p. 489, (1991) (printed in Great Britain).
- <sup>54</sup> J. C. Arnold and H. H. Sawin, *J. Appl. Phys.* 70, 5314, (1991).
- <sup>55</sup> A. Mtze, D. W. Ernie, and H. J. Oskam, *J. Appl. Phys.* 60, p. 3081, (1986).
- <sup>56</sup> Y. Okuno, Y. Ohtsu and H. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, p. 2873, (1993).
- <sup>57</sup> M. Surendra, D. B. Graves and I. J. Morey, *IEEE Trans. Plasma Science PS-19*, p. 144, (1991).
- <sup>58</sup> T.Kamata and H. Arimoto, *J. Vac. Sci. Technol. B* 14, p.3688, (1996).