

# 微細パターンの精密加工を実現するALE技術

Atomic Layer Etching (ALE) Technology Enabling Precise Etching Amount Control for Photomask Manufacturing

## 次世代EUVフォトマスクのハードマスク材料として検討されているTaOにALEを適用し、1 nm未満の高精度な加工を実証

半導体の微細化に伴い、フォトリソグラフィ向けのEUV (Extreme Ultraviolet: 極短紫外光) フォトマスク製造では、1 nm未満の加工精度を実現可能なエッチングプロセス技術が求められています。東芝は、精密な加工制御が可能なALE (Atomic Layer Etching: 原子層エッチング) プロセスを開発し、タンタル系酸化物 (以下、TaOと略記) のエッチングに適用しました。その結果、精密制御に重要な、エッチングの自己停止現象が得られるとともに、1サイクルのエッチング量が1 nm未満である0.18 nm/サイクルを実現し、ALEによる精密加工制御の可能性を実証しました。

### 背景

半導体の微細化に伴い、その製造工程の一つであるフォトリソグラフィで用いられるEUVフォトマスク製造にも微細パターンの精密加工が求められています。ロジックデバイス向けEUVフォトマスクのハードマスク層の厚さは、現行世代 (ノード長3 nm) の数十nmに対し、次世代 (ノード長2 nm) では数nmと大幅に薄くなります。従来のエッチングプロセスであるRIE (Reactive ion etching: 反応性イオンエッチング) は、エッチング量のばらつきが大きく、所望のエッチング形状を得ることが困難と考えられています。そのため、1 nm未満の加工精度を実現できる、新規のマスクエッチングプロセス技術の開発が必要です。

そこで、東芝は、精密なエッチング量制御が可能なALEを開発し、フォトマスクエッチングに適用しました。ALEプロセスは、プラズマにより被エッチング物表面へ堆積膜を形成するデポジションステップと、堆積膜と被エッチング物を選択的に反応させて除去するエッチングステップから成るサイクルの繰り返しにより行われます<sup>(1)</sup>。このとき、エッチングステップでは、反応が終了した時点でエッチングが自動的に停止すること (自己停止) が重要です。エッチングステップの時間を、自己停止後のエッチング量が一定となる時間に設定し、エッチングステップの繰り返しにより、プロセス条件の揺らぎによるエッチング量のばらつきを抑制できます。また、微細なエッチング形状の実現には、1サイクル当たりのエ

ッチング量を1 nm以下に抑制することが重要です。これらのサイクルの繰り返しにより、任意のエッチング形状を精度良く実現できます。

今回は、次世代EUVフォトマスクのハードマスク材料として検討されているTaOをモチーフに、自己停止を実現するALEプロセスと精密加工性を検証しました。

### ALEプロセスの決定

デポジションステップのポイントは、形成する堆積膜とその膜厚です。ガス種を選択により適切な堆積膜を形成した後、被エッチング物と効率的に化学反応させ、副生成物を気化させることでエッチングが進行します。ここで、堆積膜厚は、TaOのようなアモルファス材料の場合、膜厚に応じてエッチング量に変化することが知られています<sup>(1)</sup>。同じアモルファス酸化物であるSiO<sub>2</sub> (二酸化ケイ素) を用いた先行研究<sup>(2)</sup>で、エッチング量を1 nm未満にするには、堆積膜厚を同等に薄化する必要があることが分かっていることから、TaOでも同等の堆積膜厚である1 nm未満をターゲットとしました。

これらの要件に対し、デポジションステップのガス種として、TaOとの反応で常温・真空下でTaF<sub>5</sub> (フッ化タンタル) やCO (一酸化炭素) として揮発させることで、エッチングを進行させられるCF (フッ化炭素) 系のガスを選択しました。また、堆積膜厚の薄化のため、CF系ガスは、1分子当たりのCF量が少なく、プラズマ中のCFラジカル密度を低減できるCHF<sub>3</sub> (トリフルオロメタン) を選定し、Ar (アルゴン)

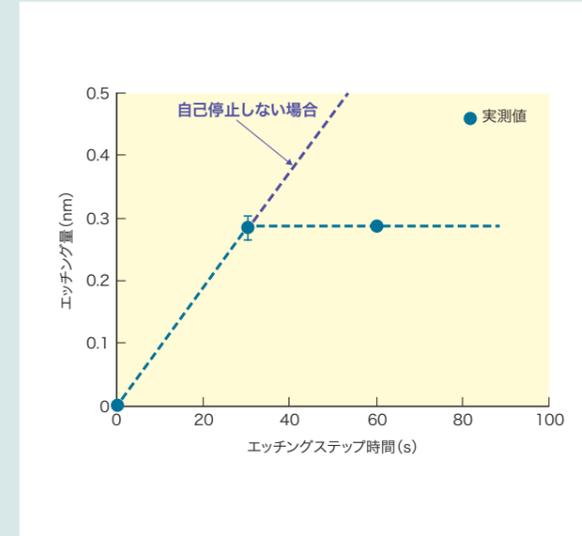


図1. TaOエッチング量のエッチングステップ時間依存性

エッチングステップ時間が30 s及び60 sでのエッチング量はほとんど変わらず、自己停止の実現性が確認できました。

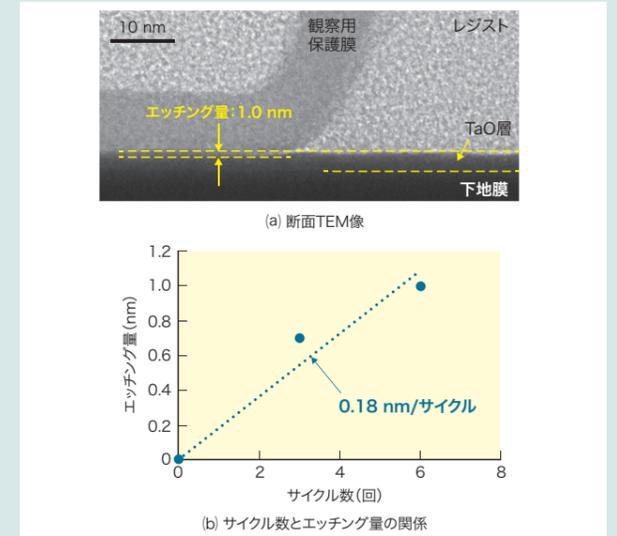


図2. ALE後の断面TEM像及びTaOエッチング量のサイクル数依存性

ALEのサイクルエッチングを適用することで、1 nm未満の精度でTaOの精密加工が実現できました。

ガスの混合により希釈しました。これにより、デポジションステップの堆積膜厚1 nm未満 (0.8 nm) を実現しました。

エッチングステップのポイントは、自己停止を実現するために、堆積膜なしでのエッチングを抑制することです。これを実現するには、まず被エッチング物と化学反応しない不活性なガスを用いる必要があります。加えて、サンプルに入射するイオンのエネルギーを小さくし、物理スパッタリングが生じないようにすることも重要です。今回は、エッチングステップにAr単ガスを用い、イオンエネルギーをバイアスパワーで調整しました。その結果、堆積膜がない場合のエッチングレートが、堆積膜がある場合の1/10以下と大幅に低減しました。

図1にこれらの条件を組み合わせるとサイクルエッチングを1回実施し、TaOのエッチング量を測定した結果を示します。エッチングステップ時間を30 s及び60 sとして評価した結果、エッチング量はそれぞれ0.28 nm、0.29 nmとほとんど変化せず、エッチングの自己停止と考えられる結果が得られました。

### 精密加工性の検証

自己停止を実現したALEプロセスを用いて、実際のフォトマスク構造を模擬したレジストパターン付きサンプルのTaO層に対し、サイクルエッチングを3回又は6回実施しました。そして、TaO層のエッチング量を断面TEM (透過型電子

顕微鏡) 像から読み取り、サイクル数との関係を評価しました。図2(a)に取得した断面TEM像を、図2(b)にサイクル数とエッチング量の関係を示します。TaOの1サイクル当たりのエッチング量は0.18 nmで、エッチング量はサイクル数にほぼ比例する結果となりました。このことから、サイクル数を調整することで任意のエッチング量を実現でき、ALEプロセスによるTaOの精密加工ができることが分かりました。

### 今後の展望

今後は、ALEプロセスを、マスク材の加工に限らず、微細加工が求められる半導体製品製造プロセスへも展開していくとともに、CN (カーボンニュートラル) やCE (サーキュラーエコノミー) の実現に向けて環境配慮型のエッチング原料ガスの基礎検討なども実施する予定です。

### 文献

- (1) 本田昌伸. プラズマを用いた原子層エッチング(ALE). 応用物理. 2019, 88, 3, p.173-179.
- (2) Metzler, D. et al. Fluorocarbon assisted atomic layer etching of SiO<sub>2</sub> using cyclic Ar/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> plasma. J. Vac. Sci. Technol. A. 2014, 32, 2, 020603.

### 井上 直樹

生産技術センター 製造プロセス・検査技術領域 材料・デバイスプロセス技術研究部 応用物理学学会会員