

## 半導体プロセスプラズマの課題 (はじめに) Recent Topics on Processing Plasma for Semiconductor Device Fabrication - Introduction -

木下 啓藏  
Keizo KINOSHITA

アイオーコア  
AIO Core

半導体デバイスの性能向上の歴史は、それを製造するプロセス技術、特にプラズマ技術の進歩に負うところが大きい。近年、プロセス制御の要求が原子オーダーに近づき、プラズマという反応場制御の高精度化と新しい適用領域の拡大が著しい。本稿は、シンポジウムのイントロダクションとして、昨今のプラズマプロセス技術において共通と考えられているキーワードについて紹介する。

### 1. 微細化・高集積化と三次元(3D)化

微細化を実現する微細加工技術は、マスクになる感光性材料の微細パターン形成技術(露光・現像)と、マスク形状をデバイス構成材料に正確に転写する異方性エッチング技術の組み合わせで実現されてきた。しかし、露光技術には難易度の高い物理限界が近づいている。また、パターンを転写する異方性エッチング技術も、材料を構成する原子のサイズに加工寸法が近づき、バラツキが無視できなくなっている。

このような微細化の限界を超えるために、基本的なデバイスの動作原理は変更せず、機能素子を高さ方向に積んで実質的に面積体積を稼ぐ三次元(3D)化技術が提案された[1]。代表的なものは縦型のトランジスタ(Fin-FET)[2]、そして3D-NANDと呼ばれる縦型のフラッシュメモリーである[3]。

3D化では、平面上で微細化を追求していた構造を膜厚方向に置き換えている。Fin構造の形成には、Self-aligned-double-patterning (SADP)と呼ばれる、犠牲パターンの側壁にコンフォーマルに形成される膜をマスクにする手法が用いられている[4]。薄い膜厚を均一に制御することは、狭い幅にエッチングするよりも実施しやすい。

一方、高い材料選択比を持つ異方性のエッチング技術は引き続き重要である。3D-NANDデバイス製造においては数十層の積層膜を貫通

するホールをエッチングする。デバイス平面への要請は若干緩和されたものの、その分だけ高さ方向の難易度が増大している。

### 2. 原子層制御プロセス

制御すべき機能素子のサイズが微細になるにつれて、原子層オーダーの成膜/エッチングプロセスに注目が集まっている[5]。特にAtomic Layer Deposition (ALD)と呼ばれる原子層制御成長技術は近年誘電体材料の形成技術として用途を大きく伸ばしている。ALDはプラズマあるいは熱により部分的に解離した原料分子(プリカーサー)を基板構成原子に結合し、不要なプリカーサーを排気するステップの後、酸化材によりプリカーサー構成原子を酸化物として固定、酸化物を一層ずつ形成する技術である。これは、プリカーサーの分解、基板への吸着、結合形成を一括して行っていた従来のプラズマプロセスを、時間的に分けて順次行う発想である。各素過程に最適な環境やプラズマを用意することが可能となり、高品質の膜形成が実現する。ハード的にはCyclicなプロセス制御のための短時間ガス供給、高速排気、プロセス条件を自動で制御するシステムが必要である。

同じような概念で一層ずつエッチングを行うAtomic Layer Etching (ALE)も多くの研究が行われている。古くは堀池らのデジタルエッチングに端を発するものである[6]。こちら、エッチャント供給による表面反応ステップと、反応生成物の脱離ステップを交互に行う。但しALEの場合はALDと異なり、吸着したエッチャントと基板原子一層のみが反応して離脱したことがわかる反応系を設定することが難しい。材料内部まで反応が進行することを防ぐメカニズムに乏しいためである。従って、実プロセス時間内に基板材料内部まで反応が進行しない飽和現象を用いるアプローチが一般的である。

### 3. 人工知能によるプロセス検討

プラズマプロセスは、マクロなサイズのプラズマからあるバラツキを持った分布のイオン種、ラジカル種を供給し、基板を改質する作業である。しかし、かなり単純な反応系でも、演繹的に原子レベルの現象からマクロなプロセス結果がわかるまでの知見や理解は十分でない。その結果、プロセスの条件検討はトライアル・アンド・エラーの状況から脱却できていない。近年、このような従来型のアプローチと異なり、多数個のエッチング後の観察結果とレシピの関係を人工知能の機械学習でデータベース化し、最適レシピを予想する検討がドライエッチング分野で試され、有効性が示されている[7]。注目されているアプローチである。

### 4. $\mu\text{m}$ オーダー以上の加工を行う新デバイス

半導体デバイスの微細化・高集積化の進展に伴い、それ以降のチップ実装工程の微細化も進んでいる。また新しく提案されてきたデバイスの製造にも半導体プロセスの適用が広がりつつある。元々は3Dと言えればそれを指したMEMS領域のチップ集積技術や、イメージセンサー、インターポザー[8]の加工プロセスがその例である。これらのデバイス加工では、高速深掘りエッチングが重要な技術となっている。Siの深掘りエッチングにおいては、Bosch法が一般的で、エッチャント供給と側壁保護を交互に行う。インターポザーのガラス加工や、シリコンフォトニクスデバイスの導波路クラッド層の $\text{SiO}_2$ 深掘りエッチング[9]では、前工程技術の応用が行われている。深掘りでは反応生成物の絶対量が多いため、装置の安定性やサンプル間の再現性について注意が必要である。

### 5. 難エッチング材料への錯体アプローチ

MRAMのように金属磁性材料、貴金属材料を用いるデバイスのエッチングでは、塩素昇温系に続いて $\text{NH}_3/\text{CO}$ 系や $\text{CH}_3\text{OH}$ による反応性エッチング技術開発が行われてきた。その際に生じる材料の化学的変質(ダメージ)の回復技術の提案[10]も行われてきたものの、汎用的に適用可能なエッチング技術としては古くから使われているArイオンミリングがまだ主流である。近年、これらの金属材料が酸化すると、有機物と錯体を形成して気化する現象が微細加工の可

能性から注目を集めている[11]。最新の報告では、なぜ酸化するとエッチングが起こるか?という反応解析も始まっている[12]。

### 6. 新しい大気圧プロセス技術

プロセスプラズマの研究ということでは近年、液中でのプラズマ生成に関する研究が盛んである。パルス放電やレーザープラズマなど、大気圧下でのプラズマ形成技術の進歩がそれを可能にしている。液中プラズマと材料の相互作用という観点では、反応系の物質密度が高い利点を生かして、フォトレジストの分解や高濃度のドーピングといった高速プロセスが期待される技術領域にて研究が行われている[13]。

### 謝辞

本研究の一部はNEDOの支援を受けた。

### 参考文献

- [1] K. Ishikawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 57, 06JA01 (2018); <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.06JA01>
- [2] <https://blog.lamresearch.com/tech-brief-finfet-fundamentals/>
- [3] Rino Micheloni, et al., Computers, 6, 27 (2017); doi:10.3390/computers6030027
- [4] N. Horiguchi, et al., Proc. of SPIE "Advanced Etch Technology for Nanopatterning V", Vol. 9782, 978209, (2016).
- [5] K. Ishikawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 56, 06HA02 (2017); <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.06HA02>
- [6] H. Sakaue, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 29, 2648 (1990); <https://doi.org/10.1143/JJAP.29.2648>
- [7] T. Ohmori, et al., Proc. 40th Int. Symp. Dry Process, C-1, p. 19 (2018).
- [8] Y. Morikawa, Proc. 40th Int. Symp. Dry Process, D-1, p. 33 (2018).
- [9] K. Kinoshita, et al., Ext. Abst. Photonics West 2018, Session 12, 10537-40, (2018).
- [10] K. Kinoshita, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 51, 08HA01 (2012); <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.08HA01>
- [11] A. Yamaguchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 52, 05EB05 (2013); <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.05EB05>
- [12] H. Bashe, et al., Proc. 40th Int. Symp. Dry Process, G-2, p. 287 (2018).
- [13] A. Ikeda, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 54 04DP02, (2015); <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.04DP02>