

小特集

先端デバイス構造を実現する 超絶ドライエッチング技術の最前線

Leading Edge of Transcendental Dry Etching Technology Realizing Advanced Device Structures

1. はじめに

1. Introduction

石川 健治, 竹田 圭吾¹⁾

ISHIKAWA Kenji and TAKEDA Keigo¹⁾

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター, ¹⁾名城大学

(原稿受付: 2021年7月25日)

1.1 半導体デバイス製造におけるプラズマ

1.1.1 半導体産業とは

2020年現在, 半導体デバイス市場は世界的に45兆円/年となっている。この内訳は, スマートフォンや自動車をはじめとする民生電子機器の大規模集積回路(ロジック)とメモリ(ダイナミック・ランダム・アクセスメモリ(DRAM)とフラッシュメモリ)をはじめ, 動力機器の制御などにパワーデバイスやオプトエレクトロニクス, センサー(カメラ, マイクロフォンなど)と, 今後もますます市場の拡大が見込まれている。これら半導体デバイスを製造するために必要となる, 製造装置や原材料の製造・供給については, 日本の企業が強い産業分野となっている。

1.1.2 プラズマが牽引する製造技術

反応性エッチングの発明と側壁転写

1960年代までは集積する回路パターンを10 μm レベルの寸法で製造しており, ウェットエッチング手法が使われていた。1973年に, 細川氏らによって, ハロゲン含有ガスをスパッタリング装置に導入することで, 反応性イオンエッチング(Reactive ion etching: RIE)が発明されたことを皮切りに, フォトリソグラフィ(リソ)の描画技術が進展していき, 2000年代に差し掛かる頃までは, リソのパターン性能のもとで作成されたマスクパターンを正確に RIE により下地に転写する技術であった。すなわち, マスクの形状寸法を保ったまま下地膜の異方性エッチングが行われる[1]。この時, プラズマエッチングでは, 被加工物全面を覆うイオンシースを介したプラズマと表面の相互作用が

本質であり, 過去から多くの研究が進められてきた。この発展については他に詳しい総説があるので参考にされたい[1-4]。

2000年以降は, パターン作製にもリソよりも, むしろプラズマ技術が牽引していく状況がもたらされた。図1下段に図示するように, プラズマCVD (Chemicals Vapor Deposition) 製膜でもコンフォーマル(形状に沿って等しい厚さをもつ)な堆積技術が確立してきたことで, パターンマスクの側壁に堆積した膜を元にマスク(側壁転写)を作製す

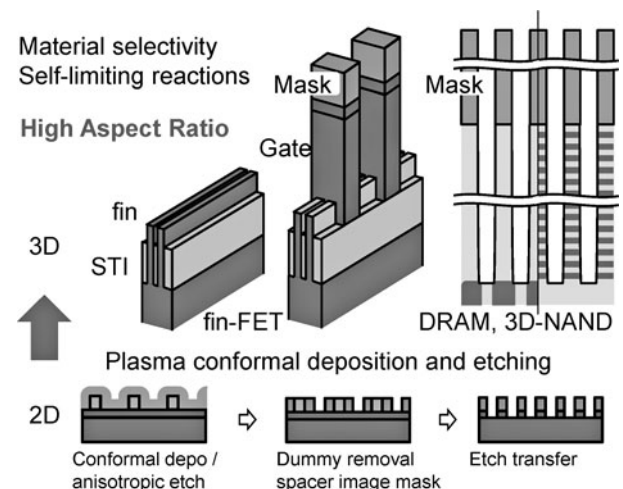


図1 プラズマCVDとプラズマエッチングの技術を駆使して作製される半導体デバイス。デバイス構造の3次元化, 高アスペクト比化が, ますますすんでいる[5]。

るダブルパターニング、マルチパターニングと呼ばれる、プラズマCVDとプラズマエッチングのRIEの技術が、デバイスパターンの縮小化を牽引している。例えば20 nmのリソパターンから10 nmの寸法に下げ、次に5 nm、さらに3 nm以下の寸法をもつパターンをつくる方法がとられている。2020年代現在では、リソは極紫外線光源(EUV)が普及してきたことで、10 nmの寸法のパターンを描画することが可能となっているが、さらなる微細化の実現のため、プラズマ技術の進展が牽引するマルチパターニング技術の重要性は、ますます高まっている[5](図1)。

高アスペクト比エッチング

2000年代以降では2つの点でエポックを画する。一つは、微細な孔を深く掘ることであり、孔の断面形状から高アスペクト比(HAR)形状と呼ばれるエッチング技術である。詳細は省くが、2008年に3D-NANDフラッシュメモリが発明された。このデバイスでは、メモリ層が厚さ方向に積層されており、メモリ容量を増加するため、積層数を増やすためには、孔を深くまで掘れる技術が要求されている[5]。

三次元パターン化

もう一つは、パターンを二次元ではなく、三次元的につくることであり、例えばフィン型の半導体チャネルをもったトランジスタの作製では、ゲート電極はフィンの周囲に沿ってRIE加工される。デバイス構造の上から加工を進める為、加工したい材料だけを除去して、それ以外の材料にはダメージを与えない必要性が増しており、材料選択性と自己停止反応の制御が求められている[6,7]。

1.1.3 製造現場で要請されること

1970年代のRIEの発明から50年、ドライエッチングの原理の理解が進み、半導体工場の至るところでプラズマを発生させてプロセスする装置が並んでいる状況である。既に技術レベルは、原子分子レベルの制御を可能とするほどに発展しており、ナノメートル以下での寸法制御を実現する『超絶ドライエッチング』の域に達しつつある。

それでも、課題はエッチング後のパターン寸法(最小となる代表寸法 Critical dimension: CD)の寸法制御、ならびに加工後の材料の性状制御(ダメージ抑制)に挙げられ、未だに完全に解決されたとは言えない。そのためにも、プラズマ科学の叡知を結集し、その解決に取り組む必要があるだろう。

HARでは深く孔を掘り進め、その孔底でのCDの制御が必要となる。このようなHARエッチングでは、断面の形状や大きさを変えずにARにして100近くのHAR孔を加工しており、今後のARが100以上のHAR孔加工を実現する『超絶エッチング技術』は開発途上である。

他にも、三次元パターン化の要求を突き詰め、製造を実現するには、構造を形作る材料に応じた反応の選択性が決め手とわかる。なぜなら、三次元構造の最初に露出するパターン面を最終的に加工し終わるまで、ダメージを与えずに加工寸法の維持を制御しなければならないからである。この通り、三次元構造を制御して加工していくためには、原子層エッチングなどと呼ばれる材料選択性を重要視して

被加工物への材料ダメージも低減するエッチング技術の開発が求められている。

プラズマの応用の側面から、今後将来に亘って『超絶エッチング』を実現し、より高度な加工を開発していくためには、科学的なプラズマと表面の反応メカニズムの理解を通じた実用化が、ますます重要となっている。

1.2 プラズマと表面の相互作用の理解

反応性プラズマと被加工物表面の間にはイオンシースが形成され、正に帯電したイオンがシース加速して照射される。この垂直入射されるイオンを原理として、加工が進む間、常にエッチングされた構造の側壁部にはイオンが照射されず、異方的な垂直形状が実現される。

将来的に高アスペクト比の向上を突き詰めていく上で、図2に示すような孔内の活性種輸送の理解を進めなければならない。例を挙げると、次のような疑問については、わかっているようで、十分にわかったとはいえない。

1. アスペクト比の高い孔底までイオンやラジカルが輸送され、反応生成物が孔外に排気されている様、
2. 孔底に露出する材料表面で、イオンとラジカルが両方照射される時に表面反応層が形成され、反応生成物が脱離されている様、

などについて、事実が精確に理解されているだろうか。正誤にかかわらず、科学的な理解は『超絶ドライエッチング』の発展には欠かせない。

まず、反応性ガスのプラズマ中では解離して生成した反応活性種(便宜上、ラジカルと呼ぶ)が反応表面に輸送され、例えば、揮発物の生成を促進するようにラジカルとイオンの相乗効果によって、ドライエッチング反応を生じる。ゆえに、ドライエッチング反応の制御には、反応性プラズマ内部の粒子反応に関する実験データに基づく理論が重要とされる。これには、分光法をはじめとする各種プラズマ計測技術を組み合わせた、使いやすさと十分な精度を

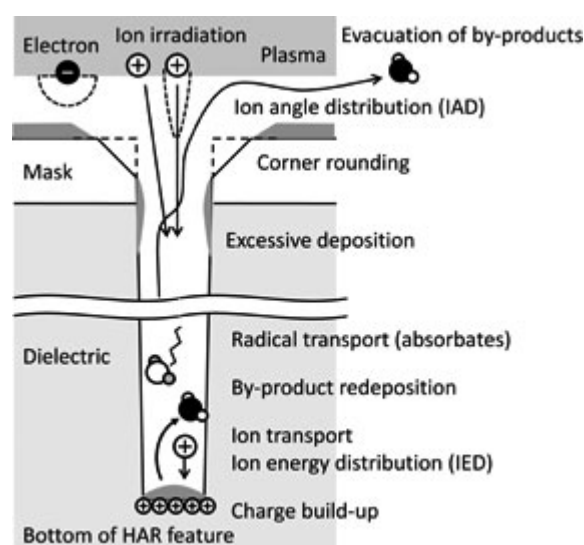


図2 高アスペクト比(HAR)構造内のイオンやラジカル、反応生成物の孔内輸送を考えたプラズマと表面の相互作用の科学的構築が要請されている[5]。

併せもつプラズマ計測技術の実現とともに、よく定義された実験系の下で信頼性の高い実験データの集積による科学基盤の構築が必須である。

今回、『超絶エッチング技術』について議論し、最先端の技術動向を掴んでもらうために、先鋭の著者らに執筆を依頼したところ、快くその労を引き受けていただけた。三次元化の背景を踏まえ、過去の知見の上により一層、複雑な構造の中でのエッチング反応や、これまでに半導体材料の加工に馴染みのない材料を含めて、複雑な構造内での反応や多種の材料が存在する中で、選択的に材料表面でエッチング反応が進行していく機構の解明に迫る、最近の研究成果を紹介いただいている。プラズマの応用を考える上

で、プラズマと表面の相互作用をはじめとする科学的な理解が重要である。そのことを今一度、改めて感じていただければ幸いである。

参考文献

- [1] T. Iwase *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SE0802 (2019).
- [2] M. Sekine, Appl. Surf. Sci. **192**, 270 (2002).
- [3] T. Iwase *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SE0803 (2019).
- [4] T. Iwase *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SE0804 (2019).
- [5] K. Ishikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 06JA01 (2018).
- [6] K. Ishikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 06HA02 (2017).
- [7] K. Ishikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SE0801 (2019).