

第 87 回応用物理学会秋季学術講演会 シンポジウム報告

T17「低温プラズマによる半導体加工の未来」

企画：応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会

日時：2026 年 9 月 10 日（木）13:30–17:45

会場：北海道大学札幌キャンパス E310（総合教育棟 E 棟） + オンライン

世話人：榊田 創（名城大・文責）、栗田 弘史（豊橋技科大）、石島 達夫（金沢大）

【概要】

本シンポジウムでは、先端ロジック半導体および 3D NAND 等の微細化・大容量化を支える低温プラズマプロセスの最新動向が議論された。ナノスケールデバイス向けの精密加工技術、PFAS 規制に対応する分析・計測技術、AI や機械学習を活用したプロセスインフォマティクス（PI）など、次世代半導体製造が直面する課題と将来展望を多角的に俯瞰した。本セッションは、招待講演 5 件、一般講演 4 件で構成され、学术界および産業界から活発な議論が展開された。以下に各講演の概要を報告する。

招待講演

■「半導体プロセスにおける低温プラズマの技術課題と今後の流れ」

石川 健治（名古屋大学）、榊田 創（名城大学）

気相での活性種生成、境界層・微細構造内の輸送、および表面反応という 3 つの階層構造からなる低温プラズマプロセスの学理と技術課題を体系的に解説した。高アスペクト比（HAR）構造における輸送制御、異種材料系での高選択比加工、ダメージ抑制といった将来課題に対し、データ駆動型アプローチ（計測・シミュレーション・機械学習の統合）と反応機構解明の融合が不可欠である旨が提示された。あわせて、低環境負荷ガス導入などの環境調和型プロセスへの転換の重要性が示された。

■「微細加工と量産デバイスの現状と未来」

谷田 知史、祐川 光成（Rapidus 株式会社）

先端ロジックデバイスにおける FinFET から GAA（Gate-All-Around）構造への移行、およびセル面積縮小に伴う加工精度の厳格化について整理した。特に Middle-of-Line（MOL）領域のビアコンタクトおよびトレンチコンタクト加工において、EUV リソグラフィの限界を補うエッチングによる CD 縮小・LCDU 改善技術や、垂直形状制御・異方性の重要性が示された。最先端量産ライン構築に向けたエッチング技術の具体的役割と今後の展望が議論された。

■「ナノスケールデバイスに向けた高精度プラズマエッチング技術」

森本 未知数（株式会社日立ハイテク）

ECR プラズマエッチング装置を用い、パルス変調制御とサイクリックプロセス（エッチング／保護／パージ）を融合させた高精度形状制御技術を発表した。プラズマ・バイアスの独立パルス制御技術による EUV レジスト上の選択的デポ形成と保護、GAA ナノシート加工における Si/SiGe 界面粗さの低減、Ru の垂直加工形状改善、および低周波 DC パルスによるチャージング抑制（カーボンハードマスク加工）などの実証結果が示され、次世代デバイス加工への有効性が立証された。

■「PFAS の包括的評価に向けた分析・計測技術の現状と課題」

谷保 佐知（産業技術総合研究所）

半導体製造等で広く使用されるペル/ポリフルオロアルキル化合物（PFAS）を取り巻くグローバルな規制強化動向と、分析技術の最前線を紹介した。個別物質のターゲット分析（LC-MS/MS）のみでは捕捉しきれない超短鎖 PFAS や前駆体に対し、総有機フッ素（EOF）測定や TOP Assay、ノンターゲット分析（NTA）などを組み合わせた包括的評価体系の必要性が強調された。あわせて産総研の支援プラットフォーム「PFASOL」の取り組みが共有された。

■ 「半導体製造におけるプロセスインフォマティクス」

茂木 弘典（東京エレクトロン株式会社）

デバイス構造の複雑化に伴い爆発的に増加するプロセスパラメーターの最適化に対し、AI・機械学習技術を適用する「プロセスインフォマティクス（PI）」の適用事例を発表した。試行錯誤的な実験アプローチから脱却し、機械学習モデルを用いた予測と実験ループを回すことで、開発期間の大幅な短縮、Run ごとの膜厚均一性向上、プロセス結果の変動要因解析やハード開発へのフィードバックが可能となる先進事例が提示された。

一般講演

■ 「HF プラズマによる窒化膜のクライオエッチング機構の解明」

蕭 世男（名古屋大学）他

3D NAND フラッシュメモリの高積層化を支える技術として、HF プラズマを用いた低温（クライオ）エッチングにおける窒化膜（SiN）の反応機構をその場計測技術（ATR-FTIR 等）により解析した。基板温度の低下とともに SiO₂のエッチング速度が急増するのに対し、SiN では表面に生成されるヘキサフルオロケイ酸アンモニウム（AFS）塩の分解挙動がネックとなりエッチング速度が低下することを明らかにし、表面反応モデルを提案した。

■ 「クメンプラズマ CVD を用いたハードマスク用 a-C:H 膜の製膜特性」

小野 晋次郎（九州大学）他

高密度かつ低応力なハードマスク用水素化アモルファスカーボン（a-C:H）膜の創製に向け、炭素比率の高いクメン（C₉H₁₂）を用いたプラズマ CVD 技術を報告した。基板バイアス電圧および総ガス流量が製膜速度に与える影響を解析し、低バイアス領域（≤ 400 V）で膜密度と圧縮応力が増加する一方、高バイアス領域（≥ 680 V）では応力が減少傾向を示すなど、膜質制御に関する重要な知見を示した。

■ 「ラジカル注入プラズマ CVD 法による窒素ドーパダイヤモンド薄膜の合成における N-V センタ形成」

米原 由翔（名城大学）他

量子デバイス応用が期待される窒素添加ダイヤモンド（NDD）の合成において、誘導結合プラズマとマイクロ波プラズマを組み合わせたラジカル注入 CVD（RICVD）法を適用した結果を報告した。低～中窒素濃度領域（100–500 ppm）において、高い結晶性を維持したまま、従来の MWCVD 法を上回る強度で N-V センタ形成が促進されることを実証した。

■ 「汎用 MLP による SiO₂ エッチングイールド角度依存性の予測」

市川 尚志（キオクシア株式会社）ほか

RIE 形状シミュレーションの重要パラメータであるエッチングイールドの角度依存性を予測するため、汎用機械学習力場（MLP: PFP）を用いた分子動力学（MD）計算を実施した。実験データの取得が難しい 80 度以上の高入射角度領域を含め、物理スパッタおよび化学スパッタ双方のイールド変化傾向を半定量的に再現することに成功し、未知材料・ガス系へのシミュレーション適用可能性を示した。

【まとめ】

本シンポジウム全体を通して、原子スケールでの精密加工から AI・データ科学との融合（PI/MLP）、PFAS などの環境・規制対応に至るまで、低温プラズマ技術が次世代半導体製造を牽引する中核基盤として急速に進化していることが強く印象付けられた。学術的メカニズムの解明と産業界の実装課題が高度に連携しており、今後の半導体技術革新に向けた着実な発展が期待される。