

プラズマエッチングにおける表面形状進展 Modeling and Simulation of Feature Profile Evolution during Plasma Etching

京大院工 ○斧 高一
Kyoto Univ., ○Kouichi Ono
E-mail: ono@kuaero.kyoto-u.ac.jp

はじめに: プラズマエッチングにおける加工形状進展 (表面形状進展) のモデルは、①基板表面への反応粒子の入射と、微細パターン構造内における反応粒子の輸送、②パターン内の被エッチング表面での反応過程、および③被エッチング表面 (真空と基板との界面) の形状進展、の 3 つのモジュールから成る [1]。基板表面への入射粒子として、イオン、中性反応種、保護膜形成種 (堆積種、反応種) を考えるが、反応ガス起源の粒子のみならず、反応生成物や不純物 (壁、マスク物質) 起源の粒子も考慮する必要がある。入射粒子は、パターンの幾何学的シャドーイング、およびパターン内表面での反射 (イオンは散乱、中性粒子は再放出と呼ぶこともある) の影響の下、パターン内を輸送されて被エッチング表面に到達する。モデルでは、中性反応種の吸着・反射、酸化、化学的エッチング、イオン誘起エッチング、物理的スパッタリング、反応生成物・副生成物の表面への付着・堆積など種々の表面反応過程が考慮され、パターン内の表面からは反応生成物 (エッチング・スパッタリング生成物) が脱離して輸送される。さらに、パターン内表面でのイオンの反射や内部への侵入のダイナミクスも重要である。ここで、入射粒子はプラズマ実験・シミュレーションを参考に、また表面反応過程は、粒子ビーム (イオン、ガス) を用いた表面反応モデル実験、分子動力学 (MD) シミュレーション、プラズマ実験 (プラズマと表面の診断・解析) などを参考にモデル化する。表面形状進展の表現は、連続モデル (特性曲線法、ストリングモデル、ショックトラッキング法、レベルセット法、レイトレイシングモデルなど) と離散モデル (セルリムーバルモデル) に大別されるが、それぞれ長所・短所を有する。本講演では、プラズマエッチングにおけるナノスケールの表面形状進展のモデリングとシミュレーションに関する筆者らの最近の研究を中心に当該分野の現状を紹介し、今後の課題/期待に言及する。

モデリング・シミュレーション: 連続モデルではナノスケールの極微細な表面形状進展を再現することが難しく、筆者らは、モンテカルロ法をベースとした独自の離散モデルである原子スケールセルモデル (atomic-scale cellular model, ASCeM) を開発した [2, 3]。ASCeM はいわゆるセルモデルの改良であるが、被エッチング表面を含む解析領域を原子スケールの微小セルに分割して扱うこと、入射イオンの表面での反射・侵入を入射イオンと基板原子との間の二体ポテンシャルにもとづき連続的に計算することを特徴とする。ASCeM では、基板表面に入射する反応粒子のパラメータ (イオン・中性粒子の入射時間、位置、角度、エネルギー)、および反応粒子と基板表面との相互作用 (表面反応、反射) の決定に用いる乱数/確率過程 (stochastic process) を通して、プラズマ・表面相互作用の時間・空間的な揺らぎの効果が考慮される。2 次元モデル (ASCeM-2D; 位置空間 2 次元・速度空間 3 次元) により、Si トレンチ加工におけるナノスケールの形状異常 (CD ロス/ゲイン、マイクロトレンチ、鋭い残渣など) や形状のアスペクト比依存性を再現した [2]。さらに、3 次元モデル (ASCeM-3D; 位置・速度空間 3 次元) により、Si 表面のナノスケールのラフネスや、イオンの基板表面への入射角度に依存して発現する周期的リップル構造を再現した (図 1) [3]。

一方、古典的 MD は、エッチング表面反応過程に関する詳細な物理的・化学的理解、およびエッチング収率・しきい値やイオンの表面反射率など形状進展シミュレーションに必要な種々の基礎パラメータの取得や評価に不可欠である [4]。MD は現時点で、イオン誘起反応とともに重要な保護膜形成過程を十分考慮できず、また大規模・複雑なパターン構造にも対応できないが、10 nm あるいはそれ以下のレベルの極微細加工では、MD ベースの形状シミュレーションが期待できる [5]。

[1] 斧 高一 他: プラズマ・核融合学会誌 **85**, 165 (2009). [2] K. Ono *et al.*, *Thin Solid Films* **518**, 3461 (2010).
[3] H. Tsuda *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **32**, 031212 (2014). [4] N. Nakazaki *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 056201 (2014). [5] H. Tsuda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **2**, 116501 (2009).

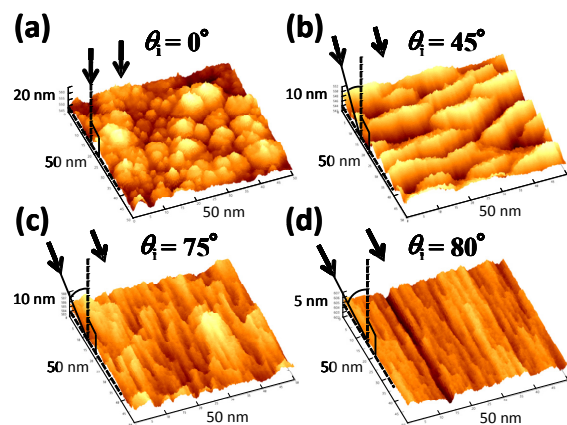


図 1. Cl₂ プラズマによる Si エッチングに関する ASCeM-3D シミュレーションの一例。基板表面に対するイオン入射角度が $\theta_i =$ (a) 0°, (b) 45°, (c) 75°, (d) 80° におけるエッチング開始後 $t = 20$ s の表面形状。