

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21110008

研究課題名(和文)プラズマと薄膜表面・界面の階層的複合反応制御による次世代ナノ加工技術の構築

研究課題名(英文)Plasma-Surface Interactions during Plasma Etching for Next-Generation Nanoscale Device Fabrication

研究代表者

斧 高一(ONO, Kouichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30311731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 53,100,000円、(間接経費) 15,930,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマエッチングにおいて基板表面に生じる微小なラフネスは、プラズマ・表面相互作用の時間・空間的不均一性(揺らぎ)に起因すると考えられる。モンテカルロ法をベースとした独自の3次元原子スケールセルモデル(ASCeM-3D)に基づくエッチング表面形状進展シミュレーションを構築して、ナノスケールデバイス作製で問題となるパターンの上底面・側壁に生じるナノスケールの表面ラフネスとリップル構造(イオン入射角度に依存)を再現した。さらに、プラズマ実験と古典的分子動力学シミュレーションをあわせて、これらの形成機構解明にせまるとともに、パルスバイアスエッチングによる表面ラフネス抑制を実験実証した。

研究成果の概要(英文)：Nanometer-scale surface roughness has become an important issue to be resolved in the fabrication of nanoscale devices, because the roughness at the feature bottom and sidewalls affects the variability in transistor performance. We have developed a three-dimensional atomic-scale cellular model (ASCeM-3D) based on the Monte Carlo algorithm, to simulate plasma-surface interactions and the nanoscale feature profile evolution during plasma etching of Si in Cl-based plasmas. Numerical results exhibited nanoscale surface roughening and rippling in response to ion incidence angle onto substrate surfaces. The mechanisms for such surface roughening and rippling of etched surfaces were investigated through a comparison with experiments, with the help of a classical molecular dynamics simulation. Based on these understanding, the pulse-bias etching through a repetitive on/off of the rf bias power was demonstrated to be one promising way of reducing the surface roughness during plasma etching.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎, 応用物理学一般

キーワード：プラズマ加工 プラズマ化学 表面・界面物性 半導体超微細化 超微細加工技術 反応粒子輸送 プラズマエッチング プラズマ・表面過程揺動

## 1. 研究開始当初の背景

(1) プラズマを用いた微細加工 (プラズマエッチング) 技術は、半導体集積回路 (ULSI) や微小電子機械 (MEMS) 作製など先端技術分野で不可欠のトップダウン微細加工プロセスである。しかし、その科学・技術の進歩の必要性は、今後のデバイスの素子や回路パターンの細かさや、3次元立体構造の進展からみても明らかである。

(2) たとえば、半導体プロセスにおける 10 nm レベルのトランジスタ形成に際して、ゲート加工において許容される電極形状の加工寸法精度は 1 nm 以下である。また、厚さ 2 nm 以下と薄い下地ゲート絶縁膜を削らない高選択性も求められ、さらに、ゲート絶縁膜の下に広がる半導体基板の変質 (ダメージ) 層も 1 nm 以下に抑える必要がある。

(3) このように、今後のプラズマエッチングには、原子 1~数個の原子層レベルの高い加工精度が求められ、加工技術としてはトップダウン加工の限界に近く、技術の高精度化において、プラズマと基板表面との相互作用に関するより詳細で高度な理解と高精度な制御が一層重要となる。

## 2. 研究の目的

ナノスケールのプラズマ加工プロセス (プラズマナノ加工) におけるプラズマと表面・界面との相互作用について、

(1) 微細パターンの上底面および側面においてナノスケールの微小な寸法誤差・形状異常・ラフネス・界面変質層 (いずれもパターン/アスペクト比依存性を含む) を生じる要因と発現機構を解明する。

(2) ナノスケールで顕在化する相互作用、特にナノスケール相互作用の揺らぎの機構モデルを構築する。ナノスケールではプラズマから基板表面に入射する反応粒子 (特にイオン) の数が少ない。したがって、ナノスケールのプラズマエッチングにおいて、イオン入射の時間・空間的不均一性 (揺らぎ) が、エッチング表面反応、ひいては表面の微細形状の時間・空間的な揺らぎを生じ、表面形状進展に至る。いいかえれば、ナノスケールでのプラズマ・表面相互作用の時間・空間的な揺らぎがナノスケールの加工精度に影響を及ぼすと考えられる。

(3) 上で構築したモデルにもとづく揺らぎの抑制法/制御法を構築し、相互作用の揺らぎに左右されない 10 nm レベルの極微細加工プロセス指針を提案する。

## 3. 研究の方法

プラズマと表面、および加工プロセスについて、いずれも実験とシミュレーションを用いて解析することにより、プラズマナノ加工

にかかわるプラズマ・表面相互作用の機構解明とともに、そのモデル構築をはかる。

(1) 表面形状進展シミュレーション: 独自の原子スケールセルモデル (ASCeM) を 2 次元 → 3 次元に拡張し、ナノスケールのプラズマエッチングにおいて生じる表面のランダムなラフネスやパターン側壁のリプル状のラフネスを含む微細な表面形状を再現するモデルを構築する。この ASCeM モデルは、解析領域を原子サイズ (2.7 Å) のセルに分割し、微細構造内の粒子輸送と種々の表面過程を、モンテカルロ (MC) 法をベースに計算するものであり、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、表面散乱・侵入) の決定に用いる乱数/確率過程を通して、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) プラズマ・プロセス実験: 表面診断 (赤外吸収分光, 原子間力顕微鏡/AFM), 表面微細形状観察 (走査型電子顕微鏡/SEM), および種々のプラズマ診断 (四重極質量分析, プローブ, マイクロ波干渉, 発光分光, 赤外吸収分光), を駆使して、表面状態 (反応・堆積・酸化など表面界面変質層), 表面微細形状 (加工形状・寸法, ラフネス), プラズマ特性 (プラズマパラメータ, 基板表面に入射する反応粒子の粒子種・エネルギー・フラックス), の間の関係を系統的に調べて明らかにする。さらに、揺らぎの抑制法/制御法を構築し、対応する微細加工プロセス指針を提案する。

(3) 古典的分子動力学 (MD) シミュレーション: 塩素・臭素系プラズマによる Si エッチングを対象として、イオンと中性ラジカル両者が基板表面に入射する場合、およびエッチング反応生成物イオンが入射する場合も考慮して、より実際のプラズマエッチングの状況に近い MD モデルを構築する。ここで、イオン入射角度は垂直入射のみならず斜め入射についても考える。このような MD シミュレーションと、上記(1)の ASCeM シミュレーション、および、(2)の実験との比較・解析により、ナノスケールの微細加工精度にかかわるメカニズムを原子レベルで明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 3次元 ASCeM モデル (ASCeM-3D) による表面ラフネスとリプル構造の再現: 図 1 に、Cl<sub>2</sub> プラズマによる Si エッチングに関する ASCeM-3D シミュレーションを示す。基板表面に対するイオン入射角度が  $\theta = 0^\circ$  (垂直入射) における表面ラフネスはランダムな凹凸であるが、入射角度が大きくなるとリプル (波状の周期構造) を示す。 $\theta = 45^\circ$  ではイオン入射方向と直角にリプルが形成されるが、さらに大きな入射角度  $\theta \geq 75^\circ$  ではイオン入射方向と平行にリプルが形成さ

れる。このようなイオン入射角度  $\theta_i$  に依存して変化する表面ラフネス・リップルの再現は本研究がはじめてである。

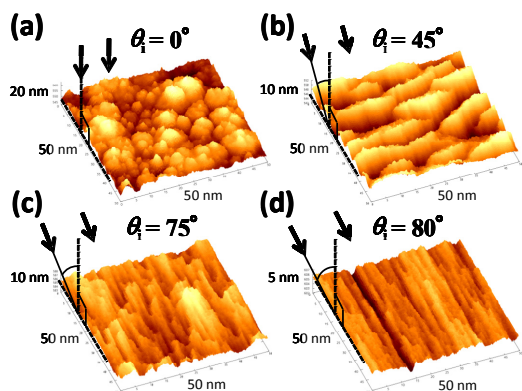


図 1.  $\text{Cl}_2$  プラズマによる Si エッチングに関する ASCeM-3D シミュレーション (イオン入射エネルギー  $E_i = 100$  eV). 基板表面に対するイオン入射角度が  $\theta_i =$  (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $75^\circ$ , (d)  $80^\circ$  におけるエッチング開始後  $t = 20$  s の表面形状。

(2) ASCeM-3D による表面ラフネス・リップルの時間進展: 図 2 に, ASCeM-3D シミュレーションから算出した Si エッチング速度  $ER$  と, 表面の二乗平均平方根ラフネス  $RMS$  の時間進展を示す.  $ER$  はエッチング開始後すぐに定常値を示すが,  $RMS$  は, 少しの誘導時間 ( $t < 5$  s) の後, 時間とともに発達することが明らかになった ( $RMS$  は,  $\theta_i = 0^\circ$  では  $t < 20$  s,  $\theta_i = 45^\circ$  では  $t < 60$  s でほぼ定常, 斜入射  $\theta_i \geq 75^\circ$  では  $t > 120$  s 以降もまだ増大).

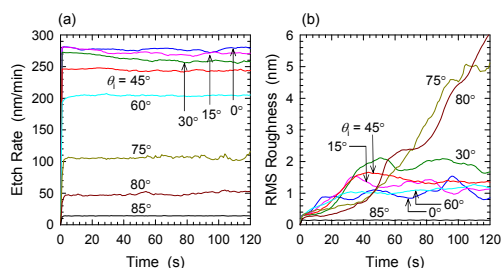


図 2.  $\text{Cl}_2$  プラズマによる Si エッチングにおける種々のイオン入射角度  $\theta_i$  に対する (a) エッチング速度と (b) 表面ラフネスの時間進展 (ASCeM-3D:  $E_i = 100$  eV,  $t = 0 \sim 120$  s).

(3) ASCeM-3D による表面ラフネス・リップル形成のパラメータ依存性: 上の(1), (2) に示した表面ラフネスの大きさや形状ならびにリップル構造は, イオン入射角度  $\theta_i$ , エッチング時間 (プラズマ暴露時間)  $t$  のみならず, イオン入射エネルギー  $E_i$ , 中性反応種とイオンの入射フラックス比  $\Gamma_n^0/\Gamma_i^0$ , 酸素とイオンの入射フラックス比  $\Gamma_o^0/\Gamma_i^0$ , 反応副生成物とイオンの入射フラックス比  $\Gamma_p^0/\Gamma_i^0$ , およびイオン入射角度分布  $\Delta\theta_i$  に依存するが, イオン入射エネルギー分布  $\Delta E_i$  にはほとんど依らない, ことが明らかになった. さらに, 基板表面温度  $T_s$ , イオンの表面散乱 (微細凹凸表面/マイクロラフネス表面でのイオン散乱), 反応生成物の表面付着確率  $S_q$  にも依存する. このような実際のプラズマエッチング

の状況に即したモデル解析は本研究がはじめてである.

(4) ASCeM-3D によるリップル構造の特徴: 図 3 に, ASCeM-3D シミュレーションにおいてイオン入射と直交する方向に伸長するリップルの時間進展を示す. ここで, 図は Si 表面形状の上面図であり, リップルは  $v_r \approx 5.2$  nm/s 程度と, エッチング速度 ( $ER \approx 260$  nm/min  $\approx 4.3$  nm/s) よりやや速い速度でイオン入射方向に進行する. さらに図に示す表面断面形状の解析より, リップルの波長は  $\lambda_r \approx 13$  nm, 振幅は  $z_r \approx 6.5$  nm 程度であり, 波長は振幅より大きいことがわかる. このようなリップル進行速度とエッチング速度, およびリップル波長と振幅は, イオン入射エネルギー  $E_i$  の増大とともに大きくなるが, 上記の相対的關係は  $E_i$  に依らない. このようなナノスケールの表面リップル構造の特徴に関する知見は, 本研究がはじめてである.

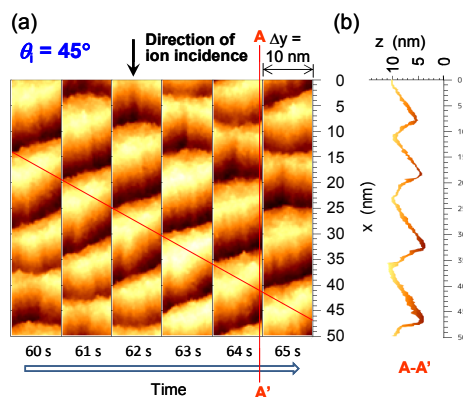


図 3.  $\text{Cl}_2$  プラズマによる Si エッチングにおける (a) イオン入射 ( $x$  方向) と直交する方向 ( $y$  方向) に伸長するリップルの時間進展 (ASCeM-3D:  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $E_i = 100$  eV,  $t = 60 \sim 65$  s) と, (b) 表面断面形状の ( $t = 64$  s). (a) は Si 表面形状の上面図 (top view,  $\Delta x \times \Delta y = 50 \times 10$  nm<sup>2</sup>).

(5) ASCeM-3D によるラフネス・リップル形成メカニズムの解明: 図 4 に, ASCeM-3D シミュレーションによる Si 表面形状の時間進展について, その上面図と空間周波数分布のパワースペクトル密度 (PSD) を示す. PSD 解析より, ①エッチング開始直後の初期段階の表面では, いずれのイオン入射角度  $\theta_i$  においても, ランダムな微小凹凸 (高さ/深さが小さく, 空間周波数が大きい/波長が小さいラフネス) が生じる, ②エッチング時間の経過とともに空間周波数が小さい/波長が長いラフネスが発達するが, その様子は  $\theta_i$  に依存し, ラフネスの発達やリップル形成に至る (図の  $\theta_i = 45^\circ$  では,  $t \approx 15$  s 以降, イオン入射  $x$  方向の空間周波数  $k_x = 0.06$  nm/波長  $\lambda_x \approx 16$  nm あたりにリップルに対応する顕著なピークが見える; PSD では図 3 の断面形状から求めた  $y$  方向に局所的な波長  $\lambda_r \approx 13$  nm と少し異なる), ③また ②の段階においても, ランダムな微小ラフネス形成は, いずれの  $\theta_i$  においてもエッチングの間持続/

存在する，ことなどがわかる。

いずれの入射角度  $\theta_i$  においてもエッチング開始直後から持続するランダムな微小ラフネス形成は，ナノスケールでの入射反応粒子パラメータやその表面との相互作用の時間・空間的不均一性（揺らぎ）による統計的なもの（stochastic roughening）である．一方，エッチング時間の経過ともなうイオン入射角度  $\theta_i$  に依存するラフネスやリップルの形成・発達は，イオン散乱，マイクロマスキング，幾何学的シャドーイング，エッチング・スパッタリング収率のイオン入射角度依存性，イオンチャネリングなどの効果によるものと考えられる．このようなナノスケールの表面ラフネス・リップル形成メカニズムに関する解析は，本研究がはじめてである．

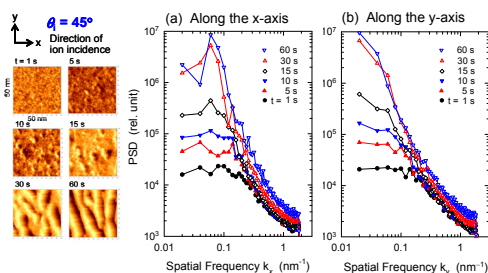


図4.  $\text{Cl}_2$ プラズマによるSiエッチングにおける表面形状の時間進展 (ASCeM-3D:  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $E_i = 100$  eV,  $t = 0 \sim 60$  s): 上面図 (top view) と, (a)イオン入射方向 (x方向) および (b)入射に直交する方向 (y方向) の空間周波数分布のパワースペクトル密度 (PSD)。

(6)実験と ASCeM-3D シミュレーションの比較: 図5に，誘導結合型高周波プラズマ (ICP) 装置を用いた  $\text{Cl}_2$  プラズマによるエッチング実験結果を示す (エッチング時間  $\Delta T = 2$  min). 基板表面へのイオン入射エネルギーの増大とともに，Si,  $\text{SiO}_2$ エッチング速度  $ER(\text{Si})$ ,  $ER(\text{SiO}_2)$  は増大し，選択比  $ER(\text{Si})/ER(\text{SiO}_2)$  は低下する，一方，Si表面ラフネス  $RMS$  は， $E_i \approx 250$  eVあたりで急峻なピークを有し， $E_i > 250$  eVでは急激に減少する，ことがわかる．図にさらに，ASCeM-3Dシミュレーションにより求めた  $ER(\text{Si})$ ,  $RMS$  ( $t = 120$  s)を示す．実験と ASCeM-3Dを比較すると，ASCeM-3Dは， $ER(\text{Si})$  vs  $E_i$  ( $E_i < 500$  eV) および  $RMS$  vs  $E_i$  ( $E_i < 250$  eV) の関係を再現するが ( $ER$ ,  $RMS$  は  $E_i$  とともに増大)， $RMS$  vs  $E_i$  ( $E_i > 250$  eV) の関係は再現しない．高い  $E_i > 250$  eVにおける  $RMS$  は，実験では  $E_i$  の増大とともに減少に転じるが，ASCeM-3Dでは増大し続ける．この比較により，①ASCeM-3Dモデルはプラズマエッチングにおける低いイオン入射エネルギー条件下 ( $E_i < 250$  eV) の3次元微細表面形状進展をおおそ再現できる，といえる．一方，②高いイオンエネルギー ( $E_i > 250$  eV) において ASCeM-3D は実験を再現できない．

さらに，図6に，図5に示した ICP- $\text{Cl}_2$  プラズマによる Siエッチング実験における Si

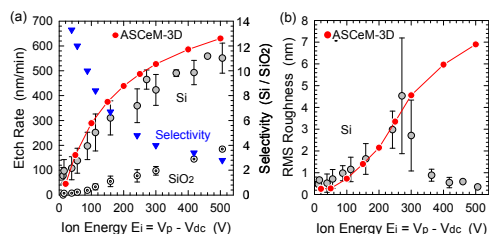


図5. ICP- $\text{Cl}_2$ プラズマによるエッチング実験: (a) Si,  $\text{SiO}_2$ エッチング速度と Si/Si $\text{O}_2$  選択比，および (b) Si表面ラフネスのイオン入射エネルギー依存性 ( $E_i = V_p - V_{dc} = 20 \sim 500$  eV,  $\Delta T = 2$  min). ASCeM-3Dシミュレーションにより求めた Siエッチング速度とラフネスをあわせて示す ( $\theta_i = 0^\circ$ ,  $E_i = 20 \sim 500$  eV,  $t = 120$  s)。

表面ラフネス  $RMS$  の時間進展を，種々のイオンエネルギー  $E_i$  について示す．低い  $E_i < 220$  eVにおけるラフネス  $RMS$  は時間とともに  $t > 20$  minの間増大し続けるが，高い  $E_i > 300$  eVにおける  $RMS$  は，エッチング開始直後  $t < 0.5$  minの間に少し増加するが，その後ほとんど時間変化せず，特に  $E_i > 470$  eVでは  $RMS \approx 0.3$  nm程度の低い値にとどまる (エッチング前の Si基板の  $RMS \approx 0.15$  nm). したがって， $E_i \approx 250$  eVあたりを境にして，低い  $E_i$  領域と高い  $E_i$  領域では Siエッチング表面反応機構が異なり，対応して，表面ラフネス形成に関して2つの機構 (roughening and smoothing modes) が存在し，低  $E_i$  においてラフネス  $RMS$  は  $E_i$  およびエッチング時間とともに増大するが，高  $E_i$  では  $RMS$  は  $E_i$  とともに減少し，またほとんど時間変化せず低い値にとどまる，と考えることができる．③ASCeM-3Dモデルは，この図6に示した低いイオン入射エネルギー  $E_i (< 250$  eV) における  $RMS$  の時間進展は再現できない ( $RMS$  は，実験では  $t > 20$  min以上増大し続けるが，図2に示した ASCeM-3D/ $\theta_i = 0^\circ$  では  $t < 20$  sでほぼ定常). このようなナノスケールの表面ラフネスに関して，競合する2つのメカニズムの指摘は，本研究がはじめてである．

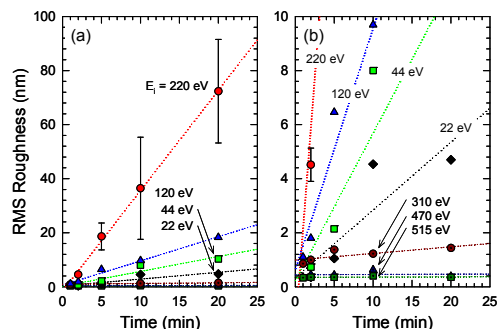


図6. ICP- $\text{Cl}_2$ プラズマによるエッチング実験における Si表面ラフネスの時間進展 ( $E_i = 20 \sim 500$  eV,  $t = \Delta T = 0 \sim 20$  min). 実験条件は図5に同じであり，(a)と (b)は縦軸 ( $RMS$ 値) のスケールが異なる．

(7)パルスバイアスによる表面ラフネス抑制の実験実証: 図2に示した ASCeM-3Dによる Si表面ラフネスの時間進展の様子を考えると，ラフネスが発達し始める前にプラズマイオン入射オフすればラフネス抑制が期待



できる. ICP-Cl<sub>2</sub>プラズマによる Si エッチングにおいて, 基板ステージに印加する高周波 (RF) バイアスを, 連続 (cw) → パルス (RF バイアス on/off) の繰り返し; 周波数  $f = 1/T = 0.01 \sim 100$  kHz) による表面ラフネス低減/抑制を実験実証した. 具体的には, パルスバイアスにより二乗平均平方根ラフネス *RMS* を 1/2 に低減できることを示した. さらに, デューティ比 ( $D = \Delta T/T$ ,  $\Delta T$  は RF バイアス on 時間) やバイアスパワーとあわせてより詳細な調整により, より顕著な *RMS* 抑制に至ると考える. このようなパルスバイアスによる表面ラフネス抑制の実験実証は本研究がはじめてである.

(8) MD シミュレーションによるエッチング反応生成物イオンの表面反応過程解析: Cl<sub>2</sub> プラズマによる Si エッチングにおけるエッチング反応ガス由来のイオン Cl<sub>x</sub><sup>+</sup> ( $x = 1, 2$ ), およびエッチング反応生成物由来のイオン SiCl<sub>x</sub><sup>+</sup> ( $x = 0-4$ ) を Si(100) 基板表面に垂直入射した場合の MD シミュレーションにより ( $\theta_i = 0^\circ$ ,  $E_i = 20-500$  eV, 2000 impacts), Cl<sup>+</sup>, Cl<sub>2</sub><sup>+</sup>, SiCl<sub>3</sub><sup>+</sup>, SiCl<sub>4</sub><sup>+</sup> イオン入射の場合,  $E_i$  の増大とともに, Si エッチング収量も増大する, 一方, SiCl<sup>+</sup>, SiCl<sub>2</sub><sup>+</sup> イオン入射の場合, それぞれ  $E_i < 300, 150$  eV では堆積が生じ,  $E_i > 300, 150$  eV においてエッチングに転じる, ことが明らかになった. これより, 上の図 5(b) に示した実験における Si 表面ラフネス *RMS* vs  $E_i$  ( $E_i > 250$  eV) の挙動 ( $E_i$  の増大とともに *RMS* 減少) は, イオン入射エネルギー  $E_i$  の増大ともなう入射イオン種の変化に起因すると考えている. このような反応生成物イオンの MD 解析は, 本研究がはじめてである.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) H. Tsuda, N. Nakazaki, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Surface roughening and rippling during plasma etching of Si: Numerical investigations and a comparison with experiments", *J. Vac. Sci. Technol. B* **32** (2014), pp. 031212-1~21. [査読有]  
DOI: 10.1116/1.4874309
- (2) N. Nakazaki, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Molecular dynamics simulations of silicon chloride ion incidence during Si etching in Cl-based plasmas", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53** (2014), pp. 056201-1~9. [査読有]  
DOI: 10.7567/JJAP.53.056201
- (3) 斧 高一, 津田博隆, 中崎暢也, 鷹尾祥典, 江利口浩二: "プラズマナノ加工における表面ラフネスとリップル形成機構", 表面科学, **34** (2013), pp. 528-534. [査読有]  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jsssj/34/10/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jsssj/34/10/_contents/-char/ja/)
- (4) Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Effect of capacitive coupling in a miniature inductively coupled plasma source", *J. Appl. Phys.* **112** (2012), pp. 093306-1~10. [査読有]  
DOI: 10.1063/1.4764333
- (5) H. Tsuda, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Modeling and Simulation of Nanoscale Surface Rippling during Plasma Etching of Si under Oblique Ion Incidence", *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012), pp. 08HC01-1~7. [査読有]  
DOI: 10.1143/JJAP.51.08HC01
- (6) H. Tsuda, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Molecular Dynamics Analysis of the Formation of Surface Roughness during Si Etching in Chlorine-based Plasmas", *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011), pp. 08KB02-1~5. [査読有]  
DOI: 10.1143/JJAP.50.08KB02
- (7) H. Tsuda, H. Miyata, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Three-dimensional Atomic-scale Cellular Model and Feature Profile Evolution during Si Etching in Chlorine-based Plasmas: Analysis of Profile Anomalies and Surface Roughness", *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011), pp. 08JE06-1~6. [査読有]  
DOI: 10.1143/JJAP.50.08JE06
- (8) Y. Takao, K. Matsuoka, K. Eriguchi, and K. Ono: "Particle Simulations of Sheath Dynamics in Low Pressure Capacitively Coupled Argon Plasma Discharges", *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011), pp. 08JC02-1~6. [査読有]  
DOI: 10.1143/JJAP.50.08JC02
- (9) K. Eriguchi, Y. Takao, and K. Ono: "Modeling of plasma-induced damage and its impacts on parameter variations in advanced electronic devices", *J. Vac. Sci. Technol. A* **29** (2011), pp. 041303-1~8. [査読有]  
DOI: 10.1116/1.3598382
- (10) H. Tsuda, M. Mori, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Atomic-scale cellular model and profile simulation of Si etching: Analysis of profile anomalies and microscopic uniformity", *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** (2010), pp. 08JE01-1~4. [査読有]  
DOI: 10.1143/JJAP.49.08JE01
- (11) 斧 高一: "先端プラズマエッチングプロセスのモデリングと体系化", 化学工業, **61** (2010), pp. 457-465. [査読無]  
<http://www.kako-sha.co.jp/2010contentskagak u.htm>
- (12) H. Tsuda, M. Mori, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono: "Atomic-scale cellular model and profile simulation of Si etching: Formation of surface roughness and residue", *Thin Solid Films*, **518** (2010), pp. 3475-3480. [査読有]  
DOI: 10.1016/j.tsf.2009.11.043
- (13) K. Ono, H. Ohta, and K. Eriguchi: "Plasma-surface interactions for advanced plasma etching processes in nanoscale ULSI device fabrication: A numerical and experimental study", *Thin Solid Films*, **518** (2010), pp. 3461-3468. [査読有]

DOI: 10.1016/j.tsf.2009.11.030

- (14) Y. Takao, N, Kusaba, K. Eriguchi, and K. Ono: “Two-dimensional particle-in-cell Monte Carlo simulation of a miniature inductively coupled plasma source”, *J. Appl. Phys.* **108** (2010), pp. 093309-1~8. [査読有]

DOI: 10.1063/1.3506536

- (15) H. Tsuda, K. Eriguchi, K. Ono, and H. Ohta: “Molecular-Dynamics-Based Profile Evolution Simulation for Sub-10-nm Si Processing Technology”, *Appl. Phys. Express*, **2** (2009), pp. 116501-1~3. [査読有]

DOI: 10.1143/APEX.2.116501

[学会発表] (計 7 件)

- (1) K. Ono: “Plasma Etch Challenges for Nanoscale Device Fabrication: Modeling, Analysis, and Control of Plasma-Surface Interactions”, 9th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2013), 2013 年 8 月 30 日, Jeju, South Korea (韓国, 済州島). [基調講演]
- (2) K. Ono: “Plasma Etching for Nanofabrication: Fundamentals, Current Status, and Future Prospects”, 11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology (APCPST 2012) and 25th Symposium on Plasma Science for Materials (SPSM25), 2012 年 10 月 2 日, Kyoto, Japan (京都市). [招待講演]
- (3) K. Ono, “Surface Roughening and Rippling during Plasma Etching”, International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), 2012 年 9 月 25 日, Yokohama, Japan (横浜市). [招待講演]
- (4) K. Ono: “Plasma-Surface Interactions for Materials Nanofabrication and Space Propulsion: A Unified Study for Technology Developments and Future Progress”, Plasma Conference 2011 (PLASMA 2011), 2011 年 11 月 22 日, Kanazawa, Japan (金沢市). [基調講演]
- (5) K. Ono: “Plasma-surface interactions in plasma etching processes for nanometer-scale microelectronic devices”, 63rd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2010) and 7th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-7), 2010 年 10 月 7 日, Paris, France (フランス, パリ市). [招待講演]
- (6) K. Ono: “Plasma-surface interactions in plasma etching of high-*k* dielectrics and metal electrode materials”, 10th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology (APCPST2010) and 23rd Symposium on Plasma Science for Materials (SPSM23), 2010 年 7 月 5 日, Jeju, South Korea [韓国, 済州島]. [招待講演]
- (7) K. Ono: “Plasma Nano-Surface Engineering for Advanced Gate Etch Process in ULSI Device Fabrication”, 7th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2009), 2009 年 9 月 23 日,

Busan, Korea (韓国, 釜山市). [招待講演]

[図書] (計 2 件)

- (1) 斧 高一: “High-*k* 膜のドライエッチング”, 「ナノエレクトロニクスにおける絶縁超薄膜技術—成膜技術と膜・界面の物性科学—», (エヌ・ティー・エス社, 2012), 第 5 編, 第 4 章, pp. 295-308. [分担執筆]
- (2) 斧 高一: “プラズマエッチングにおける表面反応機構”, 「マイクロ・ナノデバイスのエッチング技術」, 式田光宏 他 監修 (シーエムシー出版, 2009), 第二編, 第 2 章, pp. 144-158. [分担執筆]

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: ワイヤー状構造をもつ半導体の製造方法及び製造装置

発明者: 太田裕朗, 斧 高一

権利者: 京都大学

種類: 特許

番号: 特許願 2010-517754 号

出願年月日: 平成 21 年 (2009 年) 6 月 23 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 半導体処理装置のクリーニング方法およびシリコン基板のエッチング方法

発明者: 斧 高一, 北川智洋, 井上 實, 大沢正典

権利者: 京都大学, 太陽日酸株式会社

種類: 特許

番号: 特許 4836112 号

取得年月日: 平成 23 年 (2011 年) 10 月 7 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.propulsion.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

斧 高一 (ONO KOUICHI)

京都大学工学研究科・教授

研究者番号: 30311731

### (2) 研究分担者

江利口 浩二 (ERIGUCHI KOJI)

京都大学工学研究科・准教授

研究者番号: 70419448

鷹尾祥典 (TAKAO YOSHINORI)

京都大学工学研究科・助教

研究者番号: 80552661

### (3) 連携研究者

なし