

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360040

研究課題名(和文) エネルギー粒子可変ビームによるプラズマプロセス表面反応機構の解明とモデリング

研究課題名(英文) Modeling of plasma process surface reaction mechanism using energy-controllable particle beams

研究代表者

久保田 智広 (Kubota, Tomohiro)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：70322683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマエッチングにおける電荷や紫外線の影響を理解するために、入射粒子の種類ごとに切り分けた検討を行った。電荷や紫外光入射がない場合(中性粒子ビーム)、ビームの角度分布によってエッチング形状が決まることが分かった。次に、荷電粒子がある場合、イオンの軌道はシース電位分布により影響されるため、シース状態を測定するためのセンサと、測定したシース状態からイオン軌道を計算により求める方法を開発した。さらに紫外光が入射する場合については、オンウェハ紫外光照射損傷センサを用いてエッチングダメージの評価を行った。電荷や励起状態が関与する表面反応シミュレーションを確立した。

研究成果の概要(英文)：To understand influence of electric charge and ultraviolet photons in plasma etching, investigation was performed by separating different types of incident particles. Without charged particles or UV photons, etching profile was found to be determined by angular distribution of incident beam. In case of etching with charged particles, it is important to understand trajectory bending of ion. Such bending occurs by electric field of ion sheath. We developed a method to measure sheath condition and predict ion trajectory based on the measurement. Effect of UV irradiation from plasma was investigated as etching damage using on-wafer UV sensor. Surface reaction simulation was developed considering electric charge and excited states.

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：中性粒子ビーム エッチング形状予測 オンウェハモニタリング 紫外光照射損傷 イオンシース 第一原理計算 ワイヤレス測定 欠陥生成

1. 研究開始当初の背景

プラズマエッチングの理論として、Coburn と Winters が提唱したイオンアシストエッチングがある。これは、エッチング対象物表面にラジカルが吸着し、そこに電界で加速された高い運動エネルギーを持つイオンが衝突することでエッチングが起こるというものである。しかし現実には、プラズマからは荷電粒子や高エネルギーの紫外線が照射されるが、イオンアシストエッチング機構ではその効果は取り入れられていない。

このような状況の中で、研究分担者・寒川は、中性粒子ビーム装置を開発した。これは、プラズマ中の電荷・紫外光をほぼ完全に除去し、制御して照射することが可能である。すなわち、本装置はプラズマ中に含まれるエネルギー粒子の種類およびエネルギーを可変し照射するエネルギー粒子可変ビームが得られる。さらに、研究代表者・久保田は、エネルギー粒子可変ビームのフラックス・エネルギー・中性化率・光フラックス等を定量的に測定できる手段を開発した。本手段を適用すると、化学種・電荷・紫外光を切り分けて測定可能であるため、実験条件を定量的に規定することが可能となる。

これらエネルギー粒子の各々の役割と反応機構を理解するには、モデリングによる理論計算が不可欠である。Graves や Hamaguchi をはじめ多くの研究者が取り組んでいる古典分子動力学計算では、エッチング対象物の結晶構造が入射化学種の化学反応性および入射エネルギーにより乱され、エッチング生成物となって揮発していく様子を解析することができる。しかし、古典分子動力学計算では物質の電子状態を考慮できないため、紫外光による励起や荷電粒子入射による荷電状態を解析することはできなかった。また、仮にそのような計算を行ったとしても、計算と実験の比較ができず、その計算の有効性を確認することもできなかった。

研究協力者・みずほ情報総研・渡辺は、時間依存密度汎関数理論 (TD-DFT) に基づく高精度な量子計算アルゴリズムを考案し、これに基づき実用的な量子計算シミュレータを開発した。このシミュレータを用いると、物質の電子状態の時間発展を第一原理から現実的な計算時間で得ることができる。この成果に基づき、最近、中性粒子ビーム装置のカーボンアパーチャへのイオン衝突によるイオン中性化 (電荷交換) 機構を明らかにした。本シミュレータを改造すれば、電子状態を考慮した表面界面反応機構解明に用いることが可能となる。さらに研究協力者・みずほ情報総研・小野により、マクロなエッチング形状予測シミュレータの開発が進められており、実験や量子計算から導かれる反応確率等のパラメータを入力することで、エッチング形状が予測可能となりつつある。

以上のような背景に基づき、中性粒子発生装置によって得られるエネルギー粒子可変ビームを用いることで、紫外光・荷電粒子が入射しない単純な条件から実験と計算を開始し、順に複雑な条件下での実験と計算を着実に進めることで、従来とは一線を画したプラズマ表面界面反応機構の解明を目指すことができると思えるに至った。

2. 研究の目的

本研究課題では以下のことを明らかにする。(1)化学種のみが入射するイオンアシスト反応の条件および化学種と紫外光・電荷が同時に入射する条件での定量的なエッチング実験から、エッチングおよび界面準位生成における、各エネルギー粒子の役割を明らかにする。(2)エッチング反応を量子電子動力学シミュレーションで解析するためのモデルを確立し、実験と計算との融合によりプラズマ表面界面反応機構を解明する。(3)解明した反応機構に基づき、マクロなエッチング形状予測シミュレーションを開発し、実験と比較することで反応機構の理解の正しさを実証する。

3. 研究の方法

エネルギー粒子可変ビームにより、エッチング反応に対する各エネルギー粒子の影響を調べる実験を行う。

まず、紫外光・電荷のない最も単純な条件の検討を行う。ビーム照射条件からエッチング形状が得られるシミュレータを開発する。

さらに、紫外光・電荷が入射する条件についても検討を行う。入射する紫外光や電荷については、すでに開発したセンサを用いたり、新たにセンサを開発して測定を行う。これら測定結果を用いてエッチング形状を予測するシミュレータを開発する。

4. 研究成果

(1) 中性粒子ビームの計測、エッチング実験、シミュレーション

エネルギー粒子可変ビーム (図 1) を用いて、紫外光・電荷の入射がない条件におけるビームの測定・エッチング・シミュレーションを試みた。

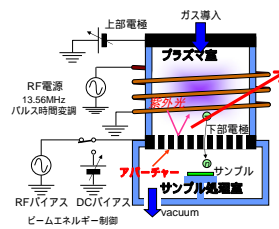


図 1 エネルギー粒子可変ビーム装置

紫外光および電荷の入射がない中性粒子ビーム (エネルギー粒子可変ビーム) のエッチング形状は、化学反応・ビームの入射エネルギー・ビームの入射角度分布により決まる比較的単純なものだと考えられる。特に、プラズマにおけるイオンアシスト反応のように、入射粒子のエネルギーを必要とする場合、かつ、入射エネルギーが十分高い場合、ビームの入射角度分布のみでほぼ決まると考えられる。

そこで、ビームの入射角度分布を測定した。測定には、オリフィス付きファラデーカップを用いた。その結果、エネルギー粒子可変ビーム装置に用いるアパーチャのアスペクト比を 10 または 20 と変化させることでビームの半値半幅が 6° または 3° と変化することが分かった。

一方、ビームエッチング実験については、塩素中性粒子ビームを用いたシリコントレンチ構造エッチングの実験を行った。エッチング後、走査型電子顕微鏡(SEM)で形状を観察した。アパーチャのアスペクト比を 10 から 20 へと変化させることで、エッチング形状がより垂直になる様子が観察された。また、プラズマエッチングにおいては、高アスペクト比構造ではエッチング形状が曲がってしまう現象が見られた。これはプラズマエッチングにおける電荷の効果と考えられ、電荷の効果とビーム入射角度分布の効果とを切り分けることに成功した(図2)。

さらに、中性粒子ビームエッチングのシミュレーションを検討した。中性粒子ビーム装置のアパーチャ入り口部分におけるシース電位分布を考慮することでアパーチャへの入射角度分布を求めた(図3)。さらに、シリコンと塩素中性粒子ビームの場合について、運動エネルギーを持った塩素中性粒子ビームによってエッチングが促進するモデル(中性粒子アシストエッチング)を想定し、セルリムモデルによるエッチング形状シミュレーションを構築した。その結果、実験のエッチング形状をよく再現するシミュレーション結果を得ることができた。

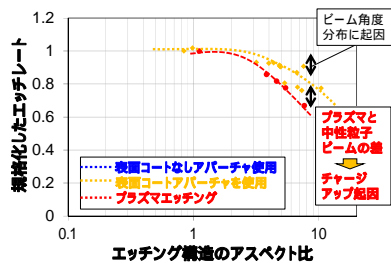


図2 中性粒子ビームとプラズマにおけるエッチング形状の比較

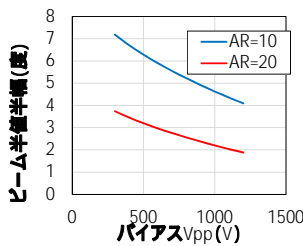


図3 アパーチャアスペクト比、印加バイアスとビーム角度分布の関係(シミュレーション)

(2) プラズマの計測、エッチング実験、シミュレーション

次に、プラズマエッチングの理解のために、プラズマの測定・エッチング・シミュレーションを試みた。

プラズマが物体と接する界面にできるイオンシースにより、イオンが加速・コリメートされ物体に入射するため、異方性エッチングが可能となる。物体が平面構造を持つ場合にはイオンシースも平面構造を持ちイオンは物体に垂直に加速されるが、物体が3次元構造を持っている場合にはシースが物体表面構造に沿って曲がるため、イオン軌道が曲げられ、最終的にエッチング形状が曲げられる。これはプラズマが電荷を持っているため

に起こる効果であり、プラズマエッチングの理解にはこの効果の理解が不可欠である。したがって、シースの状態を測定し、その測定結果に基づいてエッチング形状を定量的に予測する方法を開発した。

図4に開発したセンサ(シース形状センサ)を示す。プラズマから入射する荷電粒子を電流として測定することが可能である。また、プラズマエッチング装置のステージの電位を知ることができる。これらの測定結果からシース厚さやシース電位分布を計算することが可能である。塩素プラズマを用いた測定例を図4に示す。

一方、測定と同じプラズマ条件を用いて、垂直段差を持つサンプルを用いたエッチング実験を行った。その結果の例を図5に示す。この例では725 μm の垂直段差を持つサンプルを用いてシリコントレンチ形状のエッチングを行った。その結果、段差付近ではエッチング形状が傾いていることが分かった。さらに、センサ測定から得られたデータを用いて、段差近傍の電位分布およびイオン軌道を計算した。その結果を図6に示す。計算結果は実験結果とよく一致している。このように、電荷に起因するエッチング形状異常を予測することができた。

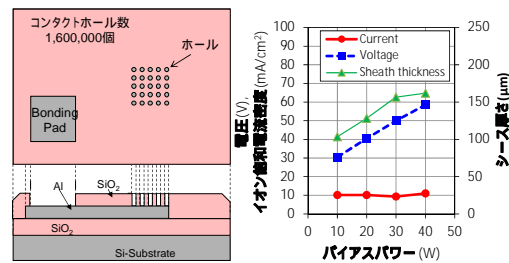


図4 シース形状センサの構造と測定例

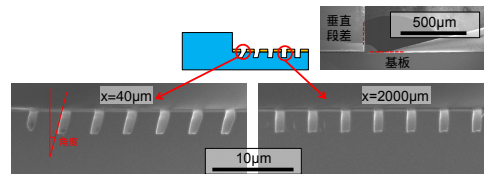


図5 段差を持つサンプルのエッチング結果

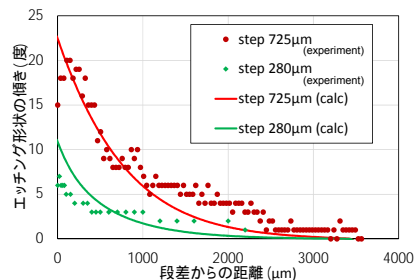


図6 実験結果と計算結果の比較

次に、プラズマエッチングにおける紫外線入射の影響について調べるために、塩素プラズマおよび SiCl_4 プラズマによるGaNエッチングを例に取り、紫外線照射測定およびエッチングダメージ評価を行った。

まず、すでに確立したオンウエハ・紫外光照射損傷センサを用いて両プラズマから照射される紫外光のスペクトルと絶対強度を測定した。その結果を図7に示す。 Cl_2 のプラ

ズマからは、短波長領域の紫外光が強く放射されることが分かる。一方、SiCl₄のプラズマからは、長波長の紫外光が強く放射されることが分かる。一方、これらのプラズマを用いてGaNのエッチングを行い、フォトルミネセンスを測定した。その結果、バンドギャップに相当する発光と、欠陥に対応する発光（イエローバンド）が観測され、イエローバンドの発光強度比が塩素プラズマエッチング後に大きく増加する減少が見られた。これは、吸収係数が大きく表面付近でGaN吸収される短波長の紫外光の照射によって、表面付近に大量の欠陥が生成したためと考えられる。

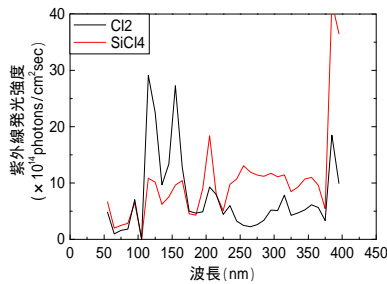


図7 Cl₂ プラズマと SiCl₄ プラズマの紫外光スペクトルの測定結果

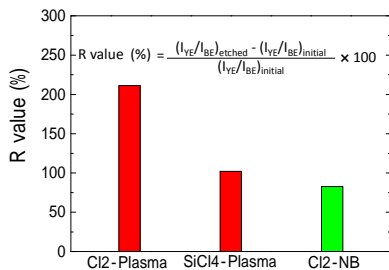


図8 GaN を Cl₂ プラズマおよび SiCl₄ プラズマでエッチングした際の PL 測定結果

(3) 量子化学計算に基づくエネルギー粒子と固体表面の反応のシミュレーション

プラズマエッチングにおける固体表面に粒子が入射することによる表面反応シミュレーションを実現するために、まず、荷電粒子が入射する際に起こる電荷移動の計算を行った。モデルケースとして、中性粒子ビーム装置においてプラズマ中のイオンがグラファイト表面に衝突することによって電荷交換を行い中性化する過程を計算することを試みた。時間依存密度汎関数理論に基づく量子計算をおこなった。グラファイト表面に塩素粒子 (Cl, Cl⁻, Cl⁺, Cl₂, Cl₂⁺) を衝突させ、反射して元の場所に戻るまでの時間変化を計算した。その後、電子密度分布を解析することにより、グラファイトと塩素粒子に所属する電子の数を算出し、電荷移動を評価した。その結果、Cl⁻とグラファイトの電子準位はほぼ同じエネルギーを持つが、Cl₂⁺とグラファイトの電子準位のエネルギーは大きく異なることが分かった(図9)。図を見ると、Cl⁻とグラファイトの HOMO は近いエネルギーを持つが、Cl₂⁺の HOMO のエネルギー準位はグラファイトの比較的深い電子準位に相当することが分かる。このことから、Cl⁻とグラファイトの間の電子移動はエネルギーがほぼ変化しない(共鳴遷移)が、Cl₂⁺とグラファイトの間の電子移動はオージェ過程の寄与

が大きいと考えられる。

もし実際にオージェ過程が起こっていれば、励起状態への遷移が見られるはずである。したがって、励起状態をも考慮した計算を行い、衝突によって起こる励起状態への遷移を調べた。図10は、励起状態への遷移確率を、元の電子のエネルギーの関数として示したものである。これを見ると、Cl₂⁺とグラファイトの衝突においては励起状態への遷移が高い確率で起こっていることが分かる。これはさきほどの予想を裏付けるものである。

このように、表面反応において電荷および励起状態を考慮したシミュレーションの構築に成功した。励起状態を考慮した計算は、紫外光入射の計算に発展できるものであると考えられ、今後の研究により表面反応メカニズムの解明がますます進展すると期待される。

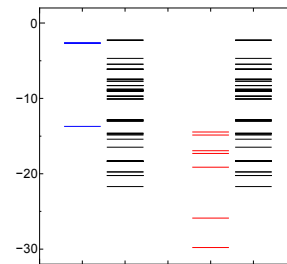


図9 Cl⁻ (青)、Cl₂⁺ (赤)、グラファイト(黒)の電子準位の計算結果

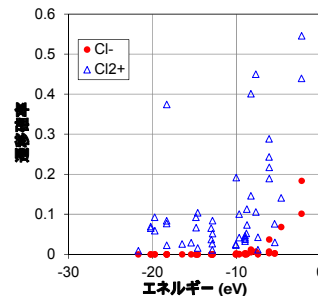


図10 塩素粒子 (Cl⁻, Cl₂⁺) とグラファイトの衝突時に起こる励起状態への電子遷移における遷移確率と電子の初期エネルギーとの関係

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6件)

- S. Ueki, Y. Nishimori, K. Miwa, S. Nakagawa, H. Imamoto, T. Kubota, M. Sugiyama, S. Samukawa, and G. Hashiguchi, Proposal of High Current Gain Vibrating-Body Field-Effect Transistor, IEEJ Trans. Sensors Micromach., 査読有, Vol. 133 (2013) pp. 332-336, DOI: 10.1541/ieejsmas.133.332
- K. Miwa, Y. Nishimori, S. Ueki, M. Sugiyama, T. Kubota, and S. Samukawa, Low-damage silicon etching using a neutral beam, J. Vac. Sci. Technol. B, 査読有, Vol. 31 (2013) pp. 051207 (6pp), DOI: 10.1116/1.4819973
- T. Kubota, H. Ohtake, R. Araki, Y.

Yanagisawa, T. Iwasaki, K. Ono, K. Miwa, and S. Samukawa, Prediction of etching-shape anomaly due to distortion of ion sheath around a large-scale three-dimensional structure by means of on-wafer monitoring technique and computer simulation, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, Vol. 46 (2013) pp. 415203 (7pp), DOI: 10.1088/0022-3727/46/41/415203

A. Wada, Y. Yanagisawa, B. Altansukh, T. Kubota, T. Ono, S. Yamasaki, and S. Samukawa, Energy-loss Mechanism of Single-crystal Silicon Microcantilever due to Surface Defects Generated during Plasma Processing, J. Micromech. Microeng., 査読有, Vol. 23 (2013) pp. 065020 (7pp), DOI: 10.1088/0960-1317/23/6/065020

D. Nakayama, A. Wada, T. Kubota, R. Bruce, R. M. Martin, M. Haass, N. Fuller, and S. Samukawa, Highly Selective Silicon Nitride Etching to Si and SiO₂ for Gate Sidewall Spacer Using CF₃I/O₂/H₂ Neutral Beam, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, Vol. 46 (2013) pp. 205203 (7pp), DOI: 10.1088/0022-3727/46/20/205203

T. Kubota, N. Watanabe, S. Ohtsuka, T. Iwasaki, K. Ono, Y. Iriye, and S. Samukawa, Numerical study on electron transfer mechanism by collision of ions at graphite surface in highly efficient neutral beam generation, J. Physics D: Appl. Phys., 査読有, Vol. 45 (2012) pp. 095202 (5pp), DOI: 10.1088/0022-3727/45/9/095202

[学会発表](計37件)

1. 久保田智広, 佐藤充男, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, オウエハエテリクによるプラズマエッチング形状異常予測, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 相模原, 2014/03/19
2. (招待講演) T. Kubota and S. Samukawa, Feature Profile Evolution in Plasma Processing using On-wafer Monitoring System, 8th International Conference on Reactive Plasmas and 31st Symposium on Plasma Processing, 福岡, 2014/02/05.
3. S. Samukawa and T. Kubota, Core Technology Consortium for Advanced Energy Devices, 10th International Conference on Flow Dynamics, 仙台, 2013/11/26.
4. (招待講演) T. Kubota and S. Samukawa, On-wafer monitoring technique for highly efficient fabrication process of nano energy devices, 10th International Conference on Flow Dynamics, 仙台, 2013/11/26.
5. N. Watanabe, S. Ohtsuka, S. Mochizuki, T. Kubota, T. Iwasaki, Y. Iriye, K. Ono, and S. Samukawa, Numerical simulation of total processes of neutral beam etching from Generation of neutral beam by collision of ions against graphite sidewall to 3-dimensional etching profile, AVS 60th International Symposium & Exhibition, アメリカ・Long Beach, 2013/10/31.
6. T. Kubota, M. Sato, T. Iwasaki, K. Ono, and S. Samukawa, Feature profile evolution in

plasma processing using on-wafer monitoring system, AVS 60th International Symposium & Exhibition, アメリカ・Long Beach, 2013/10/31.

7. 久保田智広, 佐藤充男, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, オウエハエテリクによるプラズマエッチング形状予測, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 京田辺, 2013/09/18.
8. 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 望月俊輔, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングプロセスの総合的シミュレーション, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 京田辺, 2013/09/18.
9. 望月俊輔, 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 三輪和弘, 久保田智広, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングの加工形状シミュレーション(4), 第60回応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013/03/28.
10. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 望月俊輔, 三輪和弘, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングモデルと加工形状解析(3), 第60回応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013/03/28.
11. 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 植木真治, 額賀理, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 第一原理電子状態計算による中性粒子ビーム生成効率的の解析 VII, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013/03/28.
12. 久保田智広, 三輪和弘, ハトサン・アルタスック, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 入江康郎, 小野耕平, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームによるシリコンエッチング(7), 第60回応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013/03/28.
13. 久保田智広, 佐藤充男, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, オウエハエテリクによるプラズマプロセスダメージ・形状予測, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013/03/27.
14. S. Ohtsuka, N. Watanabe, T. Kubota, T. Iwasaki, Y. Iriye, K. Ono, and S. Samukawa, Theoretical calculation of neutralization efficiency of positive and negative chlorine ions with consideration of excited states, AVS 59th International Symposium and Exhibition, アメリカ・Tampa, 2012/11/01.
15. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 望月俊輔, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングモデルと加工形状解析, 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 北九州, 2012/10/23.
16. 望月俊輔, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 三輪和弘, 久保田智広, 杉山正和, 寒川誠二, 形状シミュレーションによる塩素中性粒子ビームエッチングの加工形状の検討, 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 北九州, 2012/10/23.
17. T. Kubota, A. Wada, Y. Yanagisawa, B. Altansukh, K. Miwa, T. Ono, and S. Samukawa, 3-Dimensional and Defect-free Etching by Neutral Beam for MEMS Applications, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, 京都, 2012/09/25.
18. T. Kubota and S. Samukawa, Feature Profile Evolution in Plasma Processing Using Wireless On-Wafer Monitoring System, Ninth

- International Conference on Flow Dynamics, 仙台, 2012/09/19.
19. 久保田智広, 三輪和弘, R. Tsuchi, アルタック, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームによるシリコンエッチング (6), 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 松山, 2012/09/13.
 20. 望月俊輔, 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 三輪和弘, 久保田智広, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングの加工形状シミュレーション(3), 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 松山, 2012/09/13.
 21. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 望月俊輔, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチング モデルと加工形状解析(2), 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 松山, 2012/09/13.
 22. 荒木良亮, 久保田智広, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, ワウエルモーターとシミュレーションの融合によるプラズマ中の表面イオンシース形状と入射イオン軌道予測, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012/03/17.
 23. 望月俊輔, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 久保田智広, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチングの加工形状シミュレーション(2), 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012/03/17.
 24. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 望月俊輔, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビームエッチング モデルと加工形状解析, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012/03/17.
 25. 久保田智広, 三輪和弘, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームによるシリコンエッチング (5), 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012/03/17.
 26. (招待講演) N. Watanabe, T. Kubota, and S. Samukawa, Numerical study on electron transfer mechanism by collision of ions at graphite surface in highly-efficient neutral beam Generation, The 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing, 奈良, 2012/01/17.
 27. R. Araki, T. Kubota, and S. Samukawa, Prediction of ion sheath shape and ion trajectory during plasma etching processing using on-wafer monitoring technique and simulation, The 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing, 奈良, 2012/01/16.
 28. S. Ohtsuka, N. Watanabe, T. Iwasaki, K. Ono, Y. Iriye, Osamu Nukaga, S. Ueki, T. Kubota, M. Sugiyama, and S. Samukawa, Energy and Angular Distribution Analysis for Neutral Beam and Application for Etching Simulation, AVS 58th International Symposium & Exhibition, アメリカ・Nashville, 2011/11/03.
 29. N. Watanabe, S. Ohtsuka, T. Iwasaki, K. Ono, Yasuro Iriye, S. Ueki, Osamu Nukaga, T. Kubota, M. Sugiyama, and S. Samukawa, Theoretical analysis of electron transfer during the process of neutral beam Generation, AVS 58th International Symposium & Exhibition, アメリカ・Nashville, 2011/11/03.
 30. T. Kubota, N. Watanabe, S. Ohtsuka, K. Ono, H. Ohtake, S. Ueki, Y. Nishimori, G. Hashiguchi, and S. Samukawa, High-aspect-ratio silicon etching using large-diameter neutral beam source, AVS 58th International Symposium & Exhibition, アメリカ・Nashville, 2011/11/03.
 31. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 額賀理, 植木真治, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビーム生成におけるアパーチャ構造とエッチング特性解析, 第 28 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 東京, 2011/09/27.
 32. 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 額賀理, 植木真治, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 第一原理電子状態計算による中性粒子ビーム生成メカニズムの解析, 第 28 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 東京, 2011/09/26.
 33. 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 植木真治, 額賀理, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 中性粒子ビーム生成におけるアパーチャ構造とエッチング特性解析, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011/08/31.
 34. 渡辺尚貴, 大塚晋吾, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 植木真治, 額賀理, 杉山正和, 久保田智広, 寒川誠二, 第一原理電子状態計算による中性粒子ビーム生成メカニズムの解析 V, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011/08/31.
 35. 望月俊輔, 久保田智広, 大塚晋吾, 小野耕平, 岩崎拓也, 渡辺尚貴, 入江康郎, 杉山正和, 寒川誠二, 中性粒子ビームによるエッチングの加工形状シミュレーション, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011/08/31.
 36. 久保田智広, 大塚晋吾, 渡辺尚貴, 岩崎拓也, 小野耕平, 入江康郎, 杉山正和, 大竹浩人, 寒川誠二, 中性粒子ビームによるシリコンエッチング (4), 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011/08/31.
 37. 荒木良亮, 久保田智広, 三輪和弘, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, ワウエルモーターとシミュレーションの融合による立体形状エッチングにおけるシース形状およびイオン軌道予測, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011/08/31.
- [図書] (計 0 件)
 [産業財産権]
 出願状況 (計 0 件)
 取得状況 (計 0 件)
 [その他]
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 久保田 智広 (KUBOTA, Tomohiro)
 東北大学・流体科学研究所・准教授
 研究者番号: 70322683
 (2) 研究分担者
 寒川 誠二 (SAMUKAWA, Seiji)
 東北大学・流体科学研究所・教授
 研究者番号: 30323108