

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01073

研究課題名(和文)低温プラズマ加工の理論-計算-計測の連携環境構築による一原子一分子制御工学の創成

研究課題名(英文) Innovation in atomically controlled engineering of plasma etching technology with building a collaborative environment for theory, computation, and measurement

研究代表者

関根 誠 (Sekine, Makoto)

名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター・特任教授

研究者番号：80437087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、この解明を達成する為、反応過程を()気相中反応、()活性種輸送、()表面反応の3段階に階層化し、階層的に解析スキームを構築することを目指す。それぞれ、原理的な理論構築から計算科学を活用したシミュレーション予測、反応を素過程に細分化した実証・検証実験、さらに大量生産に対応できるエッチング装置での実験、プラズマと表面の相互作用の進展を動力学解析等で実施し、理論-計算-実験を統合した研究基盤を構築するアプローチを探索しながら、プラズマと表面の相互作用の『アトミックスケールエンジニアリング』を学問体系化し、次世代イノベーション電子情報デバイスの創出に貢献する基盤技術を開拓できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類及び地球の繁栄のための持続的な開発を推進する上で、電子情報ナノシステムの発展は欠かせない。システムを構成する集積回路・センサ・アクチュエータなどの素子の作製は、微細加工・プラズマエッチングが基盤技術となり、現在1原子1分子レベルの反応プロセス制御『アトミックスケールエンジニアリング』が要求されるにもかかわらず、プラズマエッチング技術の開発には、試行錯誤が繰り返され、理論に基づく予測や原理に則した革新的な技術が創出されているとは言い難い。このような背景から、エッチング反応の原理的な解明が必要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim to establish a hierarchical analysis scheme by dividing the reaction process into three stages: (1) reaction in the gas phase, (2) active species transport, and (3) surface reaction. For each of these reactions, we have developed a theory in principle. We have conducted simulation prediction using computational science, and demonstrated verification experiments by subdividing the reaction into elementary processes. Also we have performed etching processes that can handle mass production. We have conducted a kinetic analysis of the progress of the interaction between the plasma and the surface, in order to build a research foundation integrating theory, computation, and experiment. We have systematized "atomic scale engineering" of plasma-surface interactions and pioneered fundamental technologies that will contribute to the creation of the next generation of innovative electronic information devices.

研究分野：プラズマ応用科学

キーワード：プラズマエッチング ハイドロフロオロカーボン シリコン酸化膜 コインシデンス分光

1. 研究開始当初の背景

これまでに、反応性プラズマプロセスの気相、表面反応素過程を探索し、高精度に自律的にプロセスを制御する装置技術を開発し、高性能プラズマプロセス(エッチング、デポジション)を実現する独創的な取り組みはなされてきた。その実現に、プラズマプロセッシング装置内の反応を階層的システム科学によって解析する方法が功を奏してきた。特にフルオロカーボンプラズマを使った装置やプロセス技術は先導されており、アカデミックロードマップにもエッチングプロセス関連の反応のデータベースの構築、プロセスマップの提案がなされている。そのため、より一層、計測科学を活用し、気相中のラジカル密度や基板温度が、チャンパー全体とのシステムから決定されるプラズマ諸量と加工形状との関係を解明し、その制御の発展が望まれている状況である。

プラズマエッチング技術をはじめとする微細加工技術には、加工される形態(物理・機械)のみならず、物性(化学・材料)の制御が重要である。現状アトミックレベルの加工精度に至り、さらに微細孔といった構造内の加工プロセスが鍵となっている。このような原子レベルでの微細孔内のプラズマ誘起反応では、反応プロセスの原理的な解明が欠かせないにもかかわらず、未だこの制御法の学術基盤が構築されていない。この弊害は、未経験のガスを原料にエッチングする際、試行錯誤を繰り返すしか解決策がないといった実状に現れている。この状況から、将来に亘り、次代デバイス創出の基盤技術の革新が持続するのかどうか、先行きが危うい。この課題を打破するためにも、プラズマ加工のアトミックスケールエンジニアリングの構築は急務となっていた。

2. 研究の目的

プラズマ加工のアトミックスケールエンジニアリングの構築を目的に、

(1) 新しい(使用未経験の)ガスのプラズマ中での解離過程: プラズマ中の電子衝突によって生じるガスの解離過程について、量子化学計算により、解離反応経路を推測することはできるのか? また、その方法の精度は、どの程度で正しいのか?

(2) 活性種の輸送とその表面反応: 活性種は微細孔内で、どのように輸送されているのか? 微細孔内で反応面に到達した活性種の表面反応は、どのように進んでいるのか? また、生成した反応副生成物は、どのように脱離、排出されているのか?

これらの問いに、既存の科学の理論を活用し、また必要な理論を新しく構築することにより、活性種の定量的な取り扱いを行い、機械的に結果を予測できる方法の基盤技術の創出に取り組み、プラズマ加工のプロセッシングを階層化、統合的解析スキームの構築むことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

プラズマ加工の原理的な解明は、反応系を3段階に階層化して、()プラズマ中のガスの解離、()活性種の(微細孔内)輸送、()表面反応、それぞれに未経験ガスの使用を想定する独自のアプローチを例にとり、統合予測手法を開拓する(図1)。

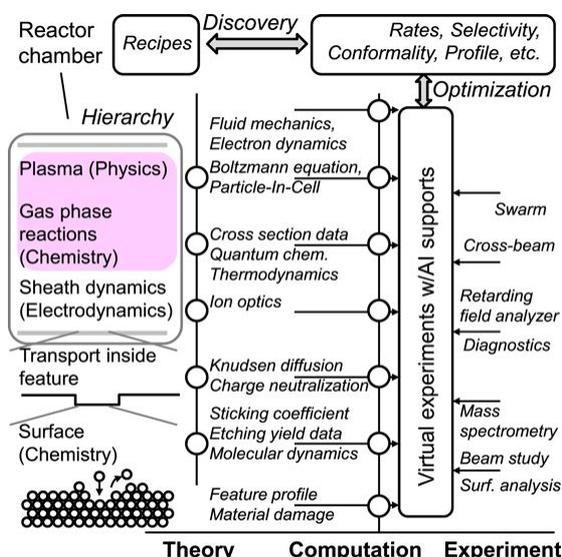


図1 理論 - 計算 - 実験を統合した、予測的なプラズマと表面の相互作用の解析スキームの創出。未経験のガスをプラズマプロセスに利用する為のバーチャル実験環境の構築の基盤技術を開拓する。統合環境を有機連携的に機能させるスキームの構築を目指す。

(K. Ishikawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 06JA01 (2018); M. Kambara, ... K. Ishikawa, Jpn. Appl. Phys. 62, SA0803 (2022). より転載)

第一の問いに対して、ハイドロフロオロカーボンガスを例に、量子化学計算により各種ガスの解離反応経路の解析を進めている。この結果、解離エネルギーなどの予測が可能となってきている。しかしながら、その予測精度や理論予測については未解明の課題であった。

そこで、シンクロトロン光（分子研 UVSOR・BL7U/BL7G）から光解離する活性種を同時（コインシデンス）測定から計算予測の精度を調べた（図2）。ここでは、プラズマエッチング候補ガス（使用未経験の意）について、実験による試行錯誤を繰り返すこと無く、プラズマ加工特性を機械的に推測するスキームが実現することを目的としている。

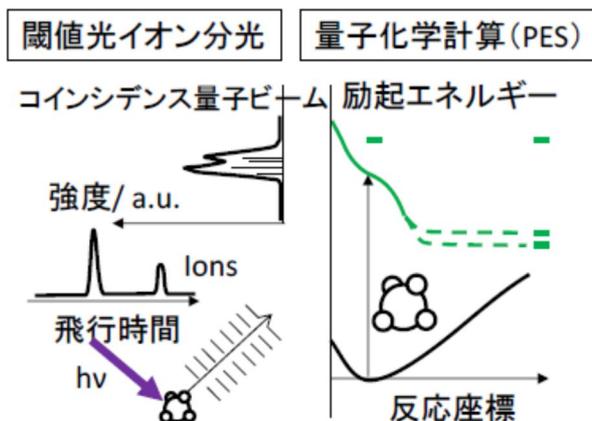


図2 閾値光イオン化，コインシデンス量子ビーム実験により，量子化学計算により求めたポテンシャルエネルギー表面から予測される解離反応の検証

次に、第二の問いに対して、前記するプラズマ中で生成される活性種の微細孔内輸送と、表面反応について、新しいガスの解離から生成する活性種、その活性種の輸送、表面反応を解明する、理論 - 計算 - 実験を統合的に活用した、プラズマ加工結果を予測予知できる、バーチャル実験環境のスキームを創出することを目的とした。

4. 研究成果

本研究では、はじめに最新課題である高アスペクト比構造で高い材料間選択比が必要な加工を目的に、使用されたことのないハイドロフルオロカーボンのエッチング反応の解明を行った。

既に、量子化学計算を実施して、炭素二原子からなるハイドロフロオロエタンのガスについて計算予測を実施した。表1には、その結果を簡単にまとめている。

表1 ハイドロフロオロエタン ($C_2H_xF_{6-x}$) のイオン化，解離で生成が予測される活性種 (T. Hayashi, K. Ishikawa, M. Sekine, et al. Jpn. J. Appl. Phys. 59, SJJE02 (2020).)

Molecules	Ions	Radical	Negative ions
C_2H_5F	CH_2F^+ , $C_2H_4F^+$, $C_2H_5^+$	C_2H_5 , CH_3 , CH_2F	F^-
CH_3CHF_2	CHF_2^+ , $C_2H_3F_2^+$, $C_2H_4F^+$	C_2H_4F , CH_3 , CHF_2	F^- , $C_2H_3F_2^-$
CH_2FCH_2F	$C_2H_4F_2^+$, CH_2F^+ , $C_2H_4F^+$, $C_2H_3F_2^+$	CH_2F , C_2H_4F	F^-
CH_2FCHF_2	CH_2F^+ , CHF_2^+ , $C_2H_3F_2^+$, $C_2H_2F^+$	$C_2H_3F_2$, CH_2F , CHF_2	F^-
CH_3CF_3	CH_3^+ , $C_2H_3F_2^+$, CF_3^+	CH_3 , CF_3 , $C_2H_3F_2$	F^- , $CH_2CF_3^-$
CHF_2CHF_2	CHF_2^+ , $C_2H_2F_3^+$	CHF_2 , $C_2H_2F_3$, C_2HF_4	F^-
CH_2FCF_3	$CF_3CH_2^+$, CF_3^+ , CH_2F^+	CF_3 , CH_2F	F^- , CF_3^-
CHF_2CF_3	$C_2HF_4^+$, CF_3^+ , CHF_2^+	CF_3 , CHF_2	F^- , CF_3^-
C_2F_6	$C_2F_5^+$, CF_3^+	CF_3	F^- , CF_3^-

この計算結果を検証する実験をおこなっている。図3に実験に使用したエッチング装置の概略を示している。本実験では、誘導性結合アンテナを用いて、プラズマに電力を投入している。ウェハ面のレベル近傍に、質量分析装置のオリフィスを設けて、エッチング中のガスをサンプリングして、その組成を質量分析した。イオン化のエネルギーをイオン化閾値近辺にすることで、ラジカル種の検出をおこなった（図4）。また、ステージにはシリコン酸化膜とシリコン窒化膜、多結晶シリコン膜のサンプルを設置して、プロセス前後での膜厚を分光エリプソメトリ

により計測して、エッチングレート算出した(図5)。その他、表面の組成についてもX線光電子分光装置で解析をおこなった。

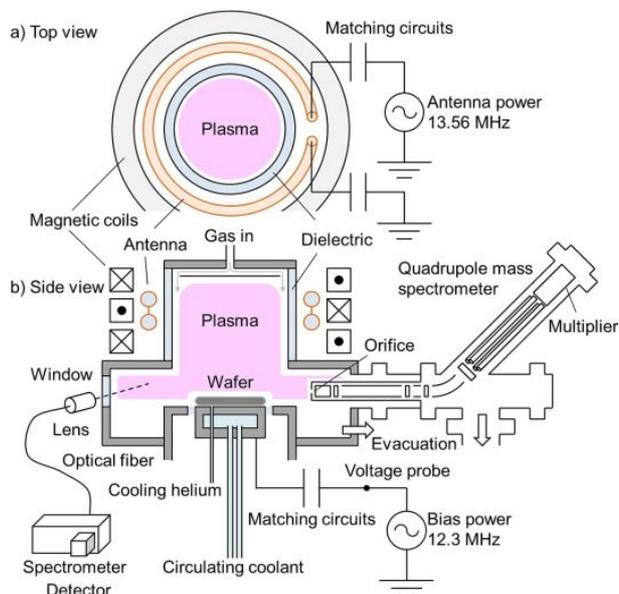


図3 実験セットアップの概略 (K. Ishikawa et al., Appl. Surf. Sci. 645, 158876 (2024).)

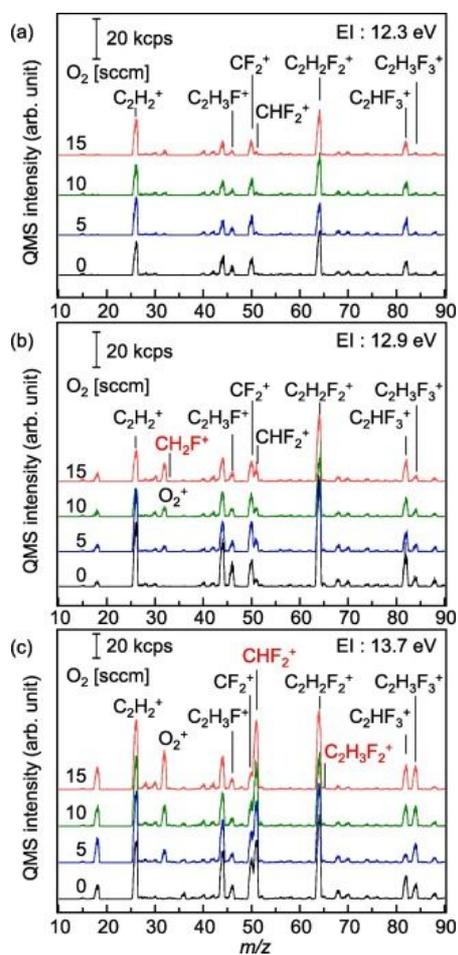


図4 閾値イオンエネルギーを変えて取得した実プロセス装置で得られる質量スペクトル (S. Hsiao, K. Ishikawa, et al., Appl. Surf. Sci. 541, 148439 (2021).)

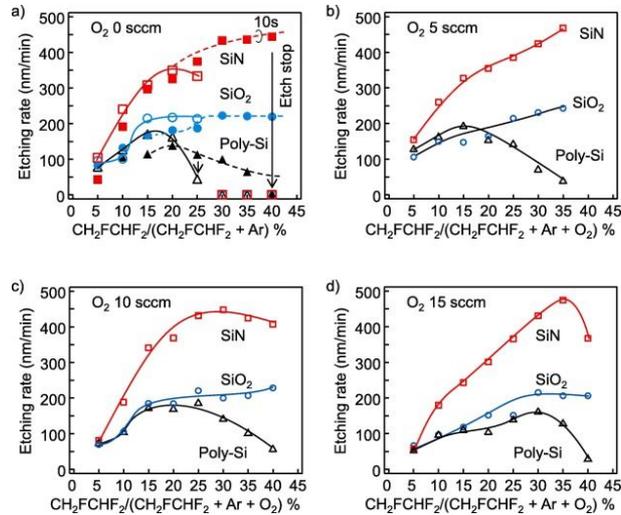


図4 ハイドロフルオロエタンの一つである CH₂FCHF₂ (1,1,2-トリフルオロエタン) に酸素を添加して、SiO₂ と SiN, poly-Si の薄膜をプラズマエッチングした時のエッチング速度の分圧依存性 (S. Hsiao, K. Ishikawa, et al., Appl. Surf. Sci. 541, 148439 (2021).)

まず、図3にみられる質量スペクトルから C-C 結合が高確率で生じ、CH₂F と CHF₂ の活性種が実証された。解離経路の予測解析を裏付けるように、CH₂F と CHF₂ の効果によって SiN のエッチング速度が選択的に高くなった。但し、酸素添加無しの場合には、分圧が高い場合に、表面にポリマー堆積を生じた。このポリマー堆積は、酸素添加によって解消し、SiN, SiO₂, poly-Si 何れの膜でもエッチングが得られる分圧範囲を拡げる結果となった。条件により、SiO₂ と poly-Si のエッチング速度が等しくなった。

気相中では酸素が関与する反応が進み、その量子化学計算も実施した。酸素添加の方が質量スペクトルで見られる活性種の CH₂F と CHF₂ の濃度が高い理由について、その生成機構の解明がなされた。

気相中の活性種組成の違いから、材料ごとのエッチング速度の違いが見られている。その決定機構について、表面のポリマー形成と反応生成物の脱離過程についても解明された。窒化膜では、膜に含まれる窒素原子が HCN と水素化物の揮発性が高く、酸化膜では水素の供給は膜に OH 基を生成し、HF をトラップしながら過剰な炭素が堆積する。その結果、酸化膜とシリコンではポリマー進み、そのポリマーを気相中の酸素によって除去されると、フッ素成分でシリコン含有の揮発物を生成することでエッチングが進行する。これらのバランスによって材料ごとのエッチング速度が異なり、材料ごとのエッチング速度を調整したい場合には、ガス分子を変えることが有効であることを示した。

さらに、気相と表面の計測を統括し、理論 - 計算 - 計測の統合アプローチを進め、バーチャル実験環境の実現、最終目標には『プラズマ加工のアトミックエンジニアリング』の学問体系化を目指す上では、解離過程を科学的にアプローチする必要がある。そこで、シンクロトロン光 (分子研 UVSOR・BL7U/BL7G) から光解離する活性種を同時 (コインシデンス) 測定から計算予測の精度検証を行った (図5)。

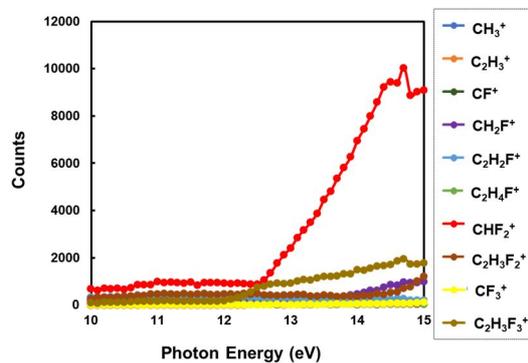


図5 1,1,2-トリフルオロエタンの光イオン化コインシデンス量子ビーム実験の結果例。

これらの取り組みからプラズマエッチング反応を、理論 - 計算 - 実験で統合的に解析する手法は、使用経験のあるガスのプラズマ加工特性の推測に限定されており、既往の研究結果から予測不可能な使用未経験のエッチングガスを対象にされたことはない。本研究の試みでは、世界で初めてプラズマ加工を階層的に有機連携的に統合解析する学術的な理論体系を構築できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kambara Makoto, Kawaguchi Satoru, Lee Hae June, Ikuse Kazumasa, Hamaguchi Satoshi, Ohmori Takeshi, Ishikawa Kenji	4. 巻 62
2. 論文標題 Science-based, data-driven developments in plasma processing for material synthesis and device-integration technologies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0803 ~ SA0803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac9189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura Shohei, Tanide Atsushi, Kimura Takahiro, Nadahara Soichi, Ishikawa Kenji, Oda Osamu, Hori Masaru	4. 巻 133
2. 論文標題 GaN damage-free cyclic etching by sequential exposure to Cl ₂ plasma and Ar plasma with low Ar ⁺ ion energy at substrate temperature of 400 °C	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 043302 ~ 043302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0131685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nguyen Thi-Thuy-Nga, Shinoda Kazunori, Hamamura Hirotaka, Maeda Kenji, Yokogawa Kenetsu, Izawa Masaru, Ishikawa Kenji, Hori Masaru	4. 巻 12
2. 論文標題 Dry etching of ternary metal carbide TiAlC via surface modification using floating wire-assisted vapor plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-24949-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Toshio, Ishikawa Kenji, Iwayama Hiroshi, Sekine Makoto, Hori Masaru	4. 巻 61
2. 論文標題 Dissociation channels of c-C ₄ F ₈ to C ₂ F ₄ in reactive plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106006 ~ 106006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac895e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Keigo, Ishikawa Kenji, Hori Masaru	4. 巻 6
2. 論文標題 Wide range applications of process plasma diagnostics using vacuum ultraviolet absorption spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-022-00075-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kurokawa Jumpei, Kondo Hiroki, Tsutsumi Takayoshi, Ishikawa Kenji, Sekine Makoto, Hori Masaru	4. 巻 205
2. 論文標題 Effects of deposition precursors of hydrogenated amorphous carbon films on the plasma etching resistance based on mass spectrometer measurements and machine learning analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 111351 ~ 111351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2022.111351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sahu Bibhuti Bhusan, Nakane Kazuya, Ishikawa Kenji, Sekine Makoto, Tsutsumi Takayoshi, Gohira Taku, Ohya Yoshinobu, Ohno Noriyasu, Hori Masaru	4. 巻 24
2. 論文標題 Study of optical emission spectroscopy using modified Boltzmann plot in dual-frequency synchronized pulsed capacitively coupled discharges with DC bias at low-pressure in Ar/O ₂ /C ₄ F ₈ plasma etching process	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 13883 ~ 13896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CP00289B	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Thi Thuy Nga, Sasaki Minoru, Hsiao Shih Nan, Tsutsumi Takayoshi, Ishikawa Kenji, Hori Masaru	4. 巻 19
2. 論文標題 Low temperature reduction of SnO ₂ by floating wire assisted medium pressure H ₂ /Ar plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 2100209 ~ 2100209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.202100209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹田圭吾, 石川健治	4. 巻 97
2. 論文標題 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 はじめに	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 508-510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹田圭吾, 石川健治	4. 巻 97
2. 論文標題 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 おわりに	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 534-536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堤隆嘉, 石川健治, 近藤博基, 関根誠, 堀勝	4. 巻 97
2. 論文標題 窒化物半導体プラズマエッチングにおける原子層反応制御と低ダメージプロセス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 517-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shih Nan Hsiao, Nikolay Britun, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, Masaru Hori	4. 巻 18
2. 論文標題 Effects of hydrogen content in films on the etching of LPCVD and PECVD SiN films using CF4/H2 plasma at different substrate temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 2100078 ~ 2100078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.202100078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R H J Vervuurt, B Mukherjee, K Nakane, T Tsutsumi, M Hori, N Kobayashi	4. 巻 37
2. 論文標題 Reaction Mechanism and Selectivity Control of Si Compound ALE Based on Plasma Modification and F-Radical Exposure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 12663 ~ 12672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c02036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shih-Nan Hsiao, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, Masaru Hori	4. 巻 11
2. 論文標題 On the Etching Mechanism of Highly Hydrogenated SiN Films by CF4/D2 Plasma: Comparison with CF4/H2	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coatings	6. 最初と最後の頁 1535 ~ 1535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/coatings11121535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shigeyuki Takagi, Suguru Kawamura, Makoto Sekine	4. 巻 61
2. 論文標題 Ar/SF6 plasma simulation for dual-frequency capacitively coupled plasma incorporating gas flow simulation and secondary electron emission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1009 ~ SA1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac1eab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryosuke Nishio, Shin Kajita, Hirohiko Tanaka, Koji Asaoka, Takayoshi Tsutsumi, Masaru Hori, Noriyasu Ohno	4. 巻 17
2. 論文標題 Nitrogen atom density measurements in NAGDIS-T using vacuum ultraviolet absorption spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201004 ~ 1201004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1201004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazunori Shinoda, Nobuya Miyoshi, Hiroyuki Kobayashi, Yuko Hanaoka, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, Masaru Hori	4. 巻 40
2. 論文標題 Plasma-assisted thermal-cyclic atomic-layer etching of tungsten and control of its selectivity to titanium nitride	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B	6. 最初と最後の頁 022201 ~ 022201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0001660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計56件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 44件)

1. 発表者名 Kenji Ishikawa
2. 発表標題 Plasma medicine and plasma bio related phenomena
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa, Taito Yoshie, Takayoshi Tsutsumi, Hiroki Kondo, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Transient Behaviors of Gaseous and Surface Reactions in a Cycle of Passivation and Etch Steps Using Ar-Based C4F8 and SF6 Plasma
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Nanoscale etching technologies for nitrides and carbides
3. 学会等名 Second Meeting of the NTC Technical Committee on Emerging Plasma Nanotechnologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Kuangda Sun, Chieh-Ju Liao, Shih-Nan Hsiao, Makoto Sekine, Toshiyuki Sasaki, Chihiro Abe, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題	Study of etching process using CHF ₃ gas condensed layer in cryogenic region
3. 学会等名	1st International Workshop on Plasma Cryogenic Etching Processes (PlaCEP2022) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kazunori Shinoda, H. Hamamura, Kenji Maeda, K. Yokogawa, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題	Surface Modification for Atomic Layer Etching of TiAlC Using Floating Wire-Assisted Liquid Vapor Plasma at Medium Pressure
3. 学会等名	22nd Atomic layer deposition and 9th atomic layer etching workshop (ALD/ALE Workshop) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Kazunori Shinoda, H. Hamamura, Kenji Maeda, Masaru Izawa, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題	Plasma-Assisted Thermal-Cyclic Etching of Silicon Germanium Selective to Germanium
3. 学会等名	22nd Atomic layer deposition and 9th atomic layer etching workshop (ALD/ALE Workshop) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	A. Osonio, Takayoshi Tsutsumi, Nagoya B. Mukherjee, R. Borude, N. Kobayashi, M. Hori
2. 発表標題	Area-Selective Atomic Layer Etching of SiO ₂ Using Silane Coupling Agent
3. 学会等名	22nd Atomic layer deposition and 9th atomic layer etching workshop (ALD/ALE Workshop) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 Shih-Nan Hsiao, Nicolay Britun, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 In situ monitoring hydrogen fluoride molecular density and its effects on etch selectivity of SiN over SiO ₂ films with hydrogen-contained fluorocarbon down-flow plasmas
3. 学会等名 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS IVC-22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Jumpei Kurokawa, Kenji Ishikawa, Takayoshi Tsutsumi, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Machine learning and contribution analysis of radicals to the properties of hydrogenated amorphous carbon films grown by a plasma-enhanced chemical vapor deposition
3. 学会等名 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS IVC-22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Interfacial reaction of gas-liquid plasma in the synthesis of functional carbon nanomaterials
3. 学会等名 5th International Union of Material Research Societies, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ma. shanlene Dela Cruz DELA VEGA, Ayane KITAHARA, Thi-thuy-nga NGUYEN, Takayoshi TSUTSUMI, Atsushi TAKANO, Yushu MATSUSHITA, Masaru HORI
2. 発表標題 Nanostructure Control and Modification of Poly(styrene-b-2-vinylpyridine) Block Copolymer in H ₂ /N ₂ Plasma Process
3. 学会等名 5th International Union of Material Research Societies, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa, Masaru Hori, and Toshiro Kaneko
2. 発表標題 Plasma-based in situ functionalization based on functional nitrogen science
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kondo, Kenji Ishikawa, Hiromasa Tanaka, Masaru Hori, Shinya Toyokuni, and Masaaki Mizuno
2. 発表標題 Biological effects of the combination with low temperature plasmas and nanoparticles-platinum and gold
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shih-Nan Hsiao, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Achieving selective etching of SiN and SiO ₂ over amorphous carbon during CF ₄ /H ₂ by controlling substrate temperature
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Nakamura, Atsushi Tanide, Masafumi Kawagoe, Soichi Nadahara, Kenji Ishikawa, Osamu Oda, and Masaru Hori
2. 発表標題 Damage mitigation in atomic layer etching of GaN by cyclic exposure of BCl ₃ gas and F ₂ added Ar plasma at high substrate temperature
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Shinoda, Nobuya Miyoshi, Hiroyuki Kobayashi, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Plasma-assisted thermal-cyclic atomic-layer etching for selective removal of thin films
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kondo, Junpei Kurokawa, Takayoshi Tsutsumi, Makoto Sekine, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Deposition mechanism of hydrogenated amorphous carbon film by C ₃ H ₆ /H ₂ mixture gas plasma
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Hashimoto, Hiroyuki Kondo, Hiromasa Tanaka, Kenji Ishikawa, Takayoshi Tsutsumi, Makoto Sekine, Takao Yasui, Yoshinobu Baba, Mineo Hiramatsu, and Masaru Hori
2. 発表標題 Highly efficient exosome capture by carbon nanowalls template
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Sekine, Bibhuti B Sahu, Shogo Hattori, Takayoshi Tsutsumi, Nikolay Britun, Kenji Ishikawa, Hirohiko Tanaka, Taku Gohira, Noriyasu Ohno, and Masaru Hori
2. 発表標題 Langmuir probe and Laser Photodetachment Study of Afterglow Phase in Dual RF Frequency Pulsed Plasma Etching Processes Operated with Synchronized DC Bias
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Airah P Osonio, Takayoshi Tsutsumi, Bablu Mukherjee, Ranjit Borude, Nobuyoshi Kobayashi, and Masaru Hori
2. 発表標題 Topographically-selective Atomic Layer Etching of SiO ₂ using fluorine-containing plasma
3. 学会等名 11th ICRP/ 2022 GEC/ 40th SPP-40/ 35th SPSM35 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kondo, T. Tsutsumi, K. Ishikawa, M. Sekine, and M. Hori
2. 発表標題 Synthesis, Functionalization, and Three-Dimensional Structuring of Carbon Nanomaterials By Gas-Liquid Interface Plasma
3. 学会等名 242nd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kazunori Shinoda, Hirotaka Hamamura, Kenji Maeda, Kenetsu Yokogawa, Masaru Izawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Impact of Bias Power and Oxygen Addition on Selective Dry Etching of TiAlC over TiN Using N ₂ /H ₂ -based Plasmas
3. 学会等名 AVS 68th International Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kazunori Shinoda, Hirotaka Hamamura, Kenji Maeda, Kenetsu Yokogawa, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Selective Dry Etching of TiAlC over TiN using N ₂ /H ₂ Plasma Chemistry
3. 学会等名 AVS 68th International Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa, Thi-Thuy-Nga Nguye, Takayoshi Tsutsumi, S-N Hsaio, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Nanoscale Dry Processes for Controlling Atomic Layer Reactions and Fabrication of High-Aspect-Ratio Features
3. 学会等名 Korean International Semiconductor Conference on Manufacturing Technology 2022 (KISM 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A.Osonio, T.Tsutsumi, B.Mukherjee, R.Borude, N.Kobayashi, M.Hori
2. 発表標題 Isotropic Plasma-enhanced Atomic Layer Etching of SiO ₂ using F radicals and Ar plasma
3. 学会等名 43rd International Symposium on Dry Process Symposium (DPS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi TSUTSUMI, Hiroki KONDO, Kenji ISHIKAWA, Makoto SEKINE, Masaru HORI
2. 発表標題 Ion Induced Damage in Plasma Enhanced Atomic Layer Etching Processing
3. 学会等名 32nd Annual Meeting on Material Research Society of Japan (MRS-J) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki TOJI, Kenji ISHIKAWA, Takayoshi TSUTSUMI, Shih nan HSIAO, Makoto SEKINE, Masaru HORI
2. 発表標題 Time-resolved measurement of ion energy distribution in pulsed Ar/SF ₆ plasma
3. 学会等名 32nd Annual Meeting on Material Research Society of Japan (MRS-J) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Shih-Nan Hsiao, Yusuke Imai, Nicolay Britun, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, Masaru Hori
2. 発表標題	Plasma diagnostics and characteristics of hydrofluorocarbon films in capacitively coupled CF ₄ /H ₂ plasmas
3. 学会等名	International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM 2022) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Kenji Ishikawa, Hiromasa Tanaka, Hirokazu Hara, Shin-ichi Kondo, Masafumi Ito, Kazunori Koga, Masaharu Shiratani, and Masaru Hori
2. 発表標題	Plasma-driven science for emerging plasma-processing technologies
3. 学会等名	ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kazunori Shinoda, Shih-Nan Hsiao, Hirokazu Hamamura, Kenji Maeda, Kenetsu Yokogawa, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題	Non-halogen plasma etching of metal gate TiAlC
3. 学会等名	ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Trung-Nguyen Tran, Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kenji Ishikawa, Shih-Nan Hsiao, Toshio Hayashi, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題	Etching silicon oxide, silicon nitride, and polysilicon films in CH ₂ FCHF ₂ hydrofluorocarbon plasma
3. 学会等名	ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 Yusuke Ando, Jumpei Kurokawa, Hiroki Kondo, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine and Masaru Hori
2. 発表標題 Contribution analysis of process parameters in plasma-enhanced chemical vapor deposition of amorphous carbon
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Imai, Shih-Nan Hsiao, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Characterization of plasmas and polymerized hydrofluorocarbon films in capacitively coupled CF ₄ /H ₂ plasmas
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Masuda, Makoto Sekine, Kenji Ishikawa, Shih-Nan Hsiao, Takayoshi Tsutsumi, Hiroki Kondo, and Masaru Hori
2. 発表標題 Study on plasma process using adsorbed C ₇ F ₁₄ as an etchant
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Izumi, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Hiroki Kondo, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Self-limited fluorination of electron-beam-irradiated GaN surface
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuki Toji, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, S-N. Hsiao, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Positive and negative ion behaviors in DC-imposed Ar/SF6 pulsed plasma
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shih-Nan Hsiao, Makoto Sekine and Masaru Hori
2. 発表標題 In situ monitoring surface structure during hydrofluorocarbon assisted atomic layer etching of silicon nitride using CF4/H2 and H2 plasmas
3. 学会等名 ISPlasma2023 / IC-PLANTS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenji Ishikawa
2. 発表標題 Plasma etching
3. 学会等名 Advanced Metallization Conference 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Thi-Thuy-Nga Nguyen, Kazunori Shinoda, Hirotaka Hamamura, Kenji Maeda, Kenetsu Yokogawa, Masaru Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Floating wire assisted plasma with vapor injection of liquid mixtures for etching titanium compounds
3. 学会等名 67th AVS International Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Shinoda, M. Hasegawa, H. Hamamura, K. Maeda, K. Yokogawa, M. Izawa, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 In-situ analysis of surface reactions for plasma-assisted thermal-cyclic atomic layer etching of tantalum nitride
3. 学会等名 67th AVS International Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taito Yoshie, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Transient effects in cyclic processes on fabrications of high-aspect-ratio trenches
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process (DPS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junpei Kurokawa, Takayoshi Tsutsumi, Kenji Ishikawa, Hiroki Kondo, Makoto Sekine, and Masaru Hori
2. 発表標題 Random forest model for property control of plasma deposited hydrogenated amorphous carbon films
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process (DPS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Nakamura Atsushi Tanide, Takahiro Kimura, Soichi Nadahara, Kenji Ishikawa, and Masaru Hori
2. 発表標題 Atomic layer etching of GaN using F2-added Ar plasma removal of BC13 modified layer at high temperature
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process (DPS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shintaro Iba, Hiroki Kondo, Kenji Ishikawa, Takayoshi Tsutsumi, Makoto Sekine, Mineo Hiramatsu, and Masaru Hori
2. 発表標題 Optical transmission of carbon nanowalls from ultra-violet region to infra-red region
3. 学会等名 Material Research Meeting (MRM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川健治
2. 発表標題 広がるプラズマ材料科学：半導体からバイオまで
3. 学会等名 MRM forum 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川健治
2. 発表標題 High-Aspect-Ratioエッチングのナノスケール制御の技術進歩
3. 学会等名 プラズマプロセスを”あやつる”～半導体ドライエッチングの最新技術～ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 健治, Nguyen Thi-Thuy-Nga, 堤 隆嘉, 蕭 世男, 近藤 博基, 関根 誠, 堀 勝
2. 発表標題 原子層エッチングの反応素過程とその設計、制御
3. 学会等名 第82回秋季応用物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南 吏坎, 石川 健治, 堤 隆嘉, 近藤 博基, 関根 誠, 小田 修, 堀 勝
2. 発表標題 窒化ガリウムのプラズマエッチング中その場分光エリブソメトリー観測
3. 学会等名 第82回秋季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉江 泰斗, 堤 隆嘉, 石川 健治, 堀 勝
2. 発表標題 Ar/C4F8/SF6を用いたガス変調サイクルプロセスにおける活性種の挙動
3. 学会等名 第82回秋季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒川 純平, 光成 正, 堤 隆嘉, 近藤 博基, 関根 誠, 石川 健治, 堀 勝
2. 発表標題 C3H6 / H2プラズマを用いたアモルファスカーボン成膜において水素ガス流量比が膜特性に与える影響
3. 学会等名 第82回秋季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本 拓海, 近藤 博基, 石川 健治, 堤 隆嘉, 関根 誠, 平松 美根男, 堀 勝
2. 発表標題 C2F6/H2混合ガスを用いてラジカル注入型プラズマ励起化学気相堆積法により成長させたカーボンナノウォールのモフォロジー制御
3. 学会等名 The 39th Symposium on plasma processing / 34th Symposium on Plasma Science for Materials (SPP39/SPSM34)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南 吏玖、中村 昭平、谷出 敦、石川 健治、堤 隆嘉、近藤 博基、関根 誠、堀 勝
2. 発表標題 窒化ガリウムの基板昇温時サイクルエッチング特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 昭平、谷出 敦、木村 貴弘、瀬原 壮一、石川 健治、小田 修、堀 勝
2. 発表標題 Ar/F2プラズマとBCl3の交互供給によるAlGaIn原子層エッチングでの組成比制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉江 泰斗、堤 隆嘉、石川 健治、近藤 博基、関根 誠、堀 勝
2. 発表標題 C4F8/SF6ガス変調サイクルにおいてバイアス印加位相がエッチング形状に及ぼす影響
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 純平、光成 正、近藤 博基、堤 隆嘉、関根 誠、石川 健治、堀 勝
2. 発表標題 C3H6/H2プラズマを用いた水素化アモルファスカーボン成膜における成膜前駆体と膜特性の相関関係
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村 光広、橋本 惇一、足立 昂拓、近藤 祐介、石川 勝朗、阿部 淳子、酒井 伊都子、林 久貴、関根 誠、堀 勝
2. 発表標題 高アスペクトホールエッチングにおけるストライエーションの形成メカニズム
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

堀・石川研究室 https://horilab.nuee.nagoya-u.ac.jp/ 名古屋大学低温プラズマ科学研究センター https://www.plasma.nagoya-u.ac.jp/ 堀・石川研究室 https://horilab.nuee.nagoya-u.ac.jp/ 低温プラズマ科学研究センター https://www.plasma.nagoya-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堤 隆嘉 (TSUTSUMI TAKAYOSHI) (50756137)	名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター・准教授 (13901)	
研究分担者	石川 健治 (ISHIKAWA KENJI) (60417384)	名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター・教授 (13901)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 俊雄 (HAYASHI TOSHIO)	名古屋大学・低温プラズマ科学研究センター・客員教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩山 洋士 (IWAYAMA HIROSHI)	自然科学研究機構・分子科学研究所	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関