

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03597

研究課題名(和文) マイクロプラズマ散逸ソリトンの周期配列の可変性とプラズマフォトリック結晶への応用

研究課題名(英文) Tunable periodic configuration of microplasma dissipative solitons and application to plasmaphotonic crystals

研究代表者

向川 政治 (MUKAIGAWA, Seiji)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：60333754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、屈折率の周期構造をマイクロプラズマの自己組織化で実現し、プラズマフォトリック結晶の実現方法として提案する。放電の六角格子構造の可変制御について研究を行い、以下の成果を得た。

1. 可変コンデンサを直列接続する方式で、マイクロギャップ誘電体バリア放電の自己組織構造の可変制御を行った。容量を連続的に変化させることで放電の六角格子構造の格子定数は連続的に変化し、0.59-0.95 mmの範囲で連続的に制御可能である。
2. 六角構造の格子定数は、駆動周波数100～300 kHz、ガス流量0～0.5L/minの条件の下で、破壊時のギャップ電圧とほぼ1対1対応にある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電磁波制御デバイスとしてのプラズマフォトリック結晶を研究することを通じて、電磁場がプラズマ自己組織化に及ぼす相互作用の学理を探求することに意義がある。本研究期間内では、誘電体バリア放電の散逸ソリトン(フィラメントと呼ばれている円形の小さいプラズマ)の配列を変化させる方法を提案し、その制御性や制御機構を実験・理論の両面から明らかにすることを目標とした。放電セルに直列に可変コンデンサを接続するという比較的単純な方法で複雑な自己組織化現象が制御できたのを目視で確認できたのは、サイエンスに興味のある人々に面白いと感じていただけるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose self-organization of the microplasma which realize the periodic structure of the refractive index as a realization method of the plasma photonic crystals. We studied the variable control of the hexagonal lattice structure of the electric discharge, and obtained following results.

1. We performed variable control of the self-organizing structure of the microgap dielectric barrier discharge by using the method of capacity-coupling. The lattice constant of the hexagonal structure of DBD changes continually by changing capacity continually and is controllable continually in the range of 0.59-0.95 mm.
2. The lattice constant of the hexagonal structure and the gap voltage at the time of the breakdown is approximately in one-to-one correspondence under the condition of driving frequency 100～300 kHz and gas flow rate 0～0.5L/min.

研究分野：放電プラズマ工学

キーワード：マイクロプラズマ 自己組織化 散逸ソリトン プラズマフォトリック結晶 容量結合方式

1. 研究開始当初の背景

マイクロプラズマは、マイクロメートル程度の寸法の微小空間に発生し、高密度・非平衡を特徴とするプラズマであり、局在性、高反応性、高輝度性という特徴を有する。フォトニック結晶は、屈折率の異なる物質を光の波長程度の間隔で周期的に配置した構造を成しており、そこを伝搬する光はブラッグ反射し、光のスペクトルに禁制帯(フォトニックバンドギャップ)を生じるものである。プラズマは密度が高まると屈折率が小さくなるので、マイクロプラズマを周期的に配置した空間は、フォトニック結晶と同等の性質を持つようになる。これはプラズマフォトニック結晶と呼ばれている(以下、本研究では電磁波の周波数帯が光とは異なるが、慣習に従って、電磁波の禁制帯をフォトニックバンドギャップ、結晶状プラズマ配位をプラズマフォトニック結晶と呼ぶことにする)。21世紀の初めの頃、マイクロプラズマの性質を独創的に応用したプラズマフォトニック結晶デバイスが提案されて以来、プラズマフォトニック結晶をマイクロプラズマで実現することは放電プラズマ研究者にとってチャレンジングなテーマとなっている。固体フォトニック結晶と比べたときの利点は、アクティブ動作が可能であること、すなわち、プラズマを駆動する電源スイッチの on-off によって結晶が現れたり消えたりすることである。

大気圧マイクロプラズマの生成には、誘電体バリア放電がよく用いられる。この放電は、ある条件では空間的対称性の高い自己組織構造を示すので、これをプラズマフォトニック結晶とみなすことが考えられる。局在性の高いフィラメント状(スポット、パルスとも呼ばれる)の自己組織構造は散逸ソリトンと呼ばれており、チューリング型の不安定性によって発生することが知られている。マイクロギャップ誘電体バリア放電における自己組織パターンの生成については、本研究の代表者は、先行研究において、自己組織構造の発現条件を詳細に調査して相図を作成した。ストライプ形状の放電などの一見スポットを成していない構造であってもフィラメントが高速運動していることや、チューリング構造の固有波数 k を大きくする手立てがわかっていた(若手研究 B)。フィラメント構造の安定生成については、その維持時間を長くするために複数の放電装置を並列化しデジタル制御することで正味の維持時間の増大化に成功した。また、誘電体表面に酸化マグネシウム層を導入することで印加電圧 1 周期あたりの放電回数を増加し放電維持時間を延ばすことに成功した(基盤研究 C,H23-25)。フィラメント構造の維持時間とプラズマ密度の増大については、マイクロギャップ放電の並列数の増加と高周波領域での生成を試み、3セル並列時においても駆動周波数の変化による空間構造の大きな変化がないこと、および、電子密度は駆動周波数が高いほど大きくなることが明らかとなった。この高周波化の傾向から、誘電体バリア放電からマイクロ波放電への移行が望ましいことが示唆された(基盤研究 C,H26-28)。

フィラメント配列構造の制御については、これまでの研究を通じて、誘電体バリアの静電容量を調整することで格子間隔が変わること、印加電圧および気圧の増減に自己組織構造に履歴減少があること、分子量の大きい気体を用いることで高流速時に現れるストライプ構造の線幅と間隔が微細化することがわかっていたが、プラズマフォトニック結晶の電磁波禁制帯を調整するには六角構造の格子定数を容易に変化できる必要があった。このような背景の下で、本研究では、フィラメントの周期配列の可変性、プラズマフォトニック結晶への応用することを目指すこととした。また、放電プラズマ中でチューリング機構により発生する散逸ソリトンと、プラズマ中を伝搬する電磁波の間の相互作用については、現時点ではプラズマ密度等のパラメータが誘電率を介して電磁波に影響を与えるという描像しかないので、これらの基本相互作用の全体像の理解に資することを目指した。

2. 研究の目的

本研究では、屈折率の周期構造をマイクロプラズマの自己組織化で実現し、電磁波制御デバイスとしてのプラズマフォトニック結晶の実現方法として提案する。この研究を通じて、電磁波と散逸ソリトンの基本相互作用(電磁場がプラズマ自己組織化に及ぼす相互作用)の学理を探求する。本研究期間内では、誘電体バリア放電の散逸ソリトンの配列を可変性する方法を提案し、その制御性と制御機構を、実験・理論の両面から明らかにすることを目標とした。

3. 研究の方法

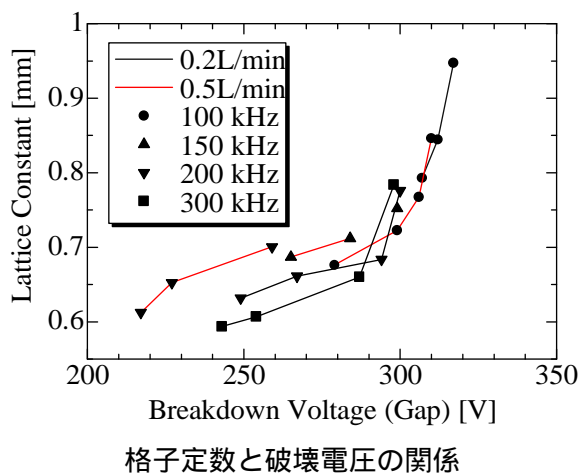
上記の目標のため、平成30年度では、マイクロプラズマ散逸ソリトンをプラズマフォトニック結晶に応用するため、放電プラズマ生成と測定に関して、(1) 外部回路の調整による散逸ソリトン周期配列の可変制御、(2) 温度制御環境下のマイクロギャップ DBD における二次電子放出係数と活性化エネルギーの測定を行った。令和元年度では、放電プラズマ生成と測定に関して、(3) 流量・ガス種を変化させたときの外部回路の調整による散逸ソリトン周期配列の可変制御、(4) マイクロギャップ DBD におけるバリアの二次電子放出係数と活性化エネルギーの理論計算、また、数値計算においては(5) 放電系反応拡散方程式の計算方法の改良を行い、流体モデルとの整合性について検討を行った。令和2年度では、放電プラズマ生成と測定に関して、(6) 印加電圧の周波数およびガス速度を変化させたときの外部回路の調整による散逸ソリトン周期配列の可

変制御、(7) マイクロギャップ DBD におけるバリアの二次電子放出係数と活性化エネルギーの理論計算を行った。また、先行研究からの継続課題として、誘電体表面の電荷密度測定法を改良し、(8) 斜め入射方位の BSO 結晶のポッケルス効果による電荷密度測定を行った。以下、研究期間を通して項目ごとに成果を記す。

4. 研究成果

(1) 散逸ソリトン周期配列の可変制御については、外部容量変化時の放電生成と観測を行った。外部容量の変化に伴い六角パターン構造の格子定数は変化し、外部回路パラメータの微調整によって六角格子構造の格子定数を 0.59~0.95 mm の範囲で連続的に制御可能であることを示した。また、異なる流量やガス種において検証し、安定な六角パターンの現れる流量の範囲、かつ He/Ar 混合比 0~100% において、外部容量の連続変化によって六角構造を制御できることを示した。

(2) 散逸ソリトン周期配列の制御機構については、外部容量変化に伴う六角パターン構造の制御性を、異なる周波数やガス速度において検証した。フィラメント構造の現れやすい周波数 100~300 kHz で印加電圧とガス速度を変化させ、外部容量の連続変化により六角構造を制御したところ、格子定数は放電ギャップの破壊電圧とほぼ一対一対応にあり、破壊電圧の増加とともに格子定数は増加することがわかった。



(3) 二次電子放出係数と活性化エネルギーの測定については、バリア温度変化時の気体の破壊電圧を測定し、タウンゼント破壊理論に基づいて、温度変化による気体分子密度の変化の効果と誘電体の二次電子放出係数の変化の効果とを分離し、二次電子放出係数の温度依存性と活性化エネルギーの値を実験的に得た。また、オージェ放出の遷移確率に基づく二次電子放出係数の温度依存性の計算方法を検討した。固体内電子にフェルミディラック分布関数を適用する方法を考案し、二次電子放出係数 $\gamma=0.1\sim 0.2$ 、および、活性化エネルギー約 0.6 eV の一次結果を得た。実験値との開きが大きいですが、今後は誘電体のトラップ準位や蓄積電荷を考慮する必要がある。

(4) 放電系反応拡散方程式の計算方法の改良については、次元解析の方法に基づいて方程式に現れるパラメータのスケーリングを行い、特に、電圧印加から放電の定常状態に至るまでの時間の高速化を試みた。回路方程式に現れる時定数を 1 ナノ秒に設定し、他のパラメータはスケーリング則に従って変化させたところ、約 3.5 μ 秒で六角構造に達し、同時に電子密度が実験値レベルまたはそれ以上増加することがわかった。また、放電系反応拡散方程式の計算方法の改良を行い、流体モデルとの整合性について検討を行った。次元解析の方法により放電進展時間の高速化を実現したことを受けて、印加電圧の交流化や流体モデルへの移行を試みているが、現在は自己組織構造の現れる条件を探索中である。これは今後も継続していく。

(5) 斜め入射方位の BSO 電荷密度測定法については、光線を斜め入射したときのポッケルス効果を確認し、入射角 62.5°において、厚さ 0.7mm の BSO 結晶への印加電圧 1V の変化に対し、干渉光変動率は $8.9\times 10^{-5}\%$ となることを示し、本方式による高帯電状態の基板表面電荷検出の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Hideki Sato ; Sou Murakami ; Seiji Mukaigawa ; Katsuyuki Takahashi ; Koichi Takaki	4. 巻 49(1)
2. 論文標題 Characteristics of Self-Organized Structure in Microgap Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 91 - 97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2020.3015280	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 Shoki Abe, Katsuyuki Takahashi, Seiji Mukaigawa, Koichi Takaki, Ken Yukimura	4. 巻 60
2. 論文標題 Comparison of plasma characteristics of high-power pulsed sputtering glow discharge and hollow-cathode discharge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 15501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abcd78	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 Yuma Saito, Kodai Shibata, Katsuyuki Takahashi, Seiji Mukaigawa, Koichi Takaki, Ken Yukimura, Hisato Ogiso, Shizuka Nakano	4. 巻 59
2. 論文標題 Silicon wafer etching by pulsed high-power inductively coupled Ar/CF4 plasma with 150 kHz band frequency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SHHE04 (1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab75b7	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 該当する

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 三浦廉, 鎌田貴晴, 高橋克之, 高木浩一, 向川政治
2. 発表標題 ファラデーシールドを用いたEモード誘導結合プラズマの空間分布の制御
3. 学会等名 第38回プラズマプロセス研究会(SPP-38)/第33回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM-33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上創, 佐藤秀樹, 高橋克幸, 高木浩一, 向川政治
2. 発表標題 誘電体バリア放電における自己組織パターンの時間発展の反応拡散方程式に基づく数値解析
3. 学会等名 第38回プラズマプロセッシング研究会(SPP-38)/第33回プラズマ材料科学シンポジウム(PSM-33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤秀樹, 村上創, 小國恭平, 向川政治, 高木浩一, 高橋克幸
2. 発表標題 容量結合方式による誘電体バリア放電の自己組織化 構造の連続制御
3. 学会等名 電気学会令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上創, 佐藤秀樹, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 反応拡散方程式に基づく容量結合方式誘電体バリア 放電における格子定数の計算
3. 学会等名 電気学会令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤一真, 武田一希, 中村嘉孝, 渡部政行, 向川政治, 鎌田貴晴
2. 発表標題 擬火花放電プラズマCVD法によるDLC膜特性に及ぼす基板バイアスの効果
3. 学会等名 電気学会令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田一希, 佐藤一真, 渡辺政行, 向川政治, 鎌田貴晴, 中村嘉孝
2. 発表標題 Investigation of Plasma Parameters and Mode Transition in Inductively Coupled Plasma with Hydrogen&Oxygen gases
3. 学会等名 電気学会令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤雄真, 柴田晃大, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一, 行村建, 小木曾久人, 中野禪
2. 発表標題 150kHz帯大電力パースト型誘導性結合Ar/CF4プラズマを用いたシリコンウエハエッチング
3. 学会等名 電気学会令和元年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤亮, 佐藤優, 増山静香, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 オージェ放出を考慮した誘電体バリアからの二次電子放出係数の温度依存性の理論計算
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部星輝, 高橋睦美, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一, 行村建
2. 発表標題 Deposition of DLC films using HiPIMS driven by spiker-sustainer pulses
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦廉, 松原翔, 鎌田貴晴, 向川 政治, 高木浩一
2. 発表標題 ファラデーシールドが及ぼす誘導結合プラズマのEモード抑制への影響
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第74回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西内祐哉, 鈴木悠介, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 LiNbO3レーザ干渉計における出力光波形の振幅変動とプラズマ環境下基板温度測定
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第74回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Takahashi, S. Abe, K. Takahashi, S. Mukaigawa, K. Takaki, Ken Yukimura
2. 発表標題 Characteristics of HiPIMS plasma driven by spiker-sustainer pulses for DLC deposition
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG), 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shibata, K. Takahashi, S. Mukaigawa, K. Takaki, Ken Yukimura
2. 発表標題 Silicon wafer etching by burst-mode high-power ICP with 150 kHz frequency band
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG), 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matsubara, R. Miura, T. Kamada, K. Takahashi, S. Mukaigawa, K. Takaki
2. 発表標題 Tuning E-mode discharge in inductively coupled plasma using an external capacitor
3. 学会等名 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-11)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Sato, Sou Murakami, Seiji Mukaigawa, Katsuyuki Takahashi, Koichi Takaki
2. 発表標題 Tunable self-organized structure of dielectric barrier discharge by using capacity coupling
3. 学会等名 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-11)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部星輝, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一, 行村建
2. 発表標題 パルス大電力ペニング放電の電気的特性
3. 学会等名 電気学会誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤雄真, 柴田晃大, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一, 行村 建
2. 発表標題 150 kHz帯大電力パルスバースト型誘導性結合プラズマのグローバル・モデル解析
3. 学会等名 電気学会放電プラズマパルスパワー合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向川政治, 小國恭平, 畠山大輝, 横田敦也, 高橋克幸, 高木浩一
2. 発表標題 容量結合方式によるマイクロギャップ自己組織化誘電体バリア放電の可変構造制御
3. 学会等名 電気学会放電プラズマパルスパワー合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤 亮, 安藤 晃, 西村康太郎, 向川政治
2. 発表標題 Application of time evolution global model to a radio-frequency discharge plasma
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 優, 渥美風紀, 多田静香, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 誘電体バリア放電における二次電子放出係数の活性化エネルギー
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 釜淵靖大, 菊池啓太, 鎌田貴晴, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 BSO結晶を用いた斜め入射方式による表面電荷測定法の確立
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田晃大, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一, 行村 建, 小木曾久人, 中野 禅
2. 発表標題 150 kHz帯大電力バーストパルス ICP によるシリコンウエハエッチング
3. 学会等名 電気学会放電プラズマパルスパワー合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村 康太郎, 松原 翔, 向川 政治, 高木 浩一
2. 発表標題 自己整合的流体モデルによる誘導結合プラズマのE-H遷移の数値計算
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 釜淵靖大, 鎌田貴晴, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 斜め入射方式によるBSO結晶を用いた 表面電荷測定法の確立
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松原 翔, 山田健太, 鎌田貴晴, 志田 寛, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 回路インピーダンス測定に基づく誘導結合プラズマの密度測定
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 優、渥美 風紀、増山 静香、志田 寛、向川 政治、高木 浩一
2. 発表標題 誘電体バリア放電における二次電子放出係数の活性化エネルギー
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋睦美, 高橋克幸, 高木浩一, 向川政治, 行村建
2. 発表標題 デュアルHiPIMSの基礎特性とDLC成膜への応用
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 優, 増山 静香, 向川 政治, 高橋 克幸, 高木 浩一
2. 発表標題 誘電体バリア放電における二次電子放出係数の活性化エネルギー
3. 学会等名 第36回プラズマプロセッシング研究会(SPP-36)/第31回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM-31)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 釜淵靖大, 鎌田貴晴, 高橋克幸, 向川政治, 高木浩一
2. 発表標題 ケイ酸ピスマス結晶を用いた斜め入射方式による表面電荷測定法
3. 学会等名 第36回プラズマプロセッシング研究会(SPP-36)/第31回プラズマ材料科学シンポジウム(SPSM-31)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 釜淵靖大、高橋克幸、向川政治、高木浩一、鎌田貴晴
2. 発表標題 BSO結晶を用いた斜め入射方式による表面電荷測定
3. 学会等名 平成30年度核融合科学研究所共同研究形式研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Takaki, Mutsumi Takahashi, Katsuyuki Takahashi, Seiji Mukaigawa and Ken Yukimura
2. 発表標題 CharacteristicsofHiPIMSDrivenbySpiker-sustainerPulsesforDLCDeposition
3. 学会等名 ISPlasma2019/IC-PLANTS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Shibata, Yuma Saito, Katsuyuki Takahashi, Seiji Mukaigawa, Koichi Takaki, Ken Yukimura, Hisato Ogiso and Shizuka Nakano
2. 発表標題 SiliconWaferEtchingbyBurst-modeHigh-powerICPwith150kHzFrequencyBand
3. 学会等名 ISPlasma2019/IC-PLANTS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	鎌田 貴晴 (Kamada Takaharu) (50435400)	八戸工業高等専門学校・その他部局等・助教 (51101)	

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
---------	---------