

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420247

研究課題名(和文)大気圧ハイドロカーボンプラズマ支援CVDによるDLC成膜技術開発に関する基礎研究

 研究課題名(英文)Fundamental Study on Research and Development of Diamond-Like Carbon Coating
Technique using Atmospheric-Pressure Hydrocarbon Plasma-assisted Chemical Vapor
Deposition

研究代表者

小田 昭紀(Oda, Akinori)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70335090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜は、高高度、低摩擦、耐摩耗などの優れた機械的特性を有しているため、自動車業界を中心とした産業界において超高速成膜が強く望まれ、精力的に研究開発がなされている。本応募課題では、そのための方策の1つとして大気圧炭化水素プラズマ支援CVD法に着目し、プラズマシミュレーションおよび計測の両面から研究を実施した。その結果、プラズマ計測からは、DLC成膜に寄与する基板へ入射する炭化水素イオン種やラジカル種の同定ならびに入射量の比が明らかになり、プラズマシミュレーションからは大気圧プラズマ制御のためには電離増倍の適切な抑制が必要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this research project, fundamental properties in hydrocarbon plasmas have been examined using both numerical simulation and diagnostic, since fast deposition of the diamond-like carbon (DLC) thin films has strongly been required in various technological fields. A numerical simulation of hydrocarbon plasmas has been conducted using an axially three-dimensional fluid model. Diagnostic of hydrocarbon plasmas has also been done using Langmuir probe technique and quadrupole mass spectrometry. From the plasma diagnostic, it was clarified that the identification and the amount of flux of ions and radicals, which play an important role in the DLC thin films deposition, in hydrocarbon plasmas. From the plasma simulation results, clarifying the mechanism of glow to arc transition is very important to produce uniform atmospheric-pressure plasmas. It is clarified that suppressing the rapid electron production through electron-impact ionization is very effective to suppress the transition.

研究分野：放電プラズマ工学

キーワード：ダイヤモンドライクカーボン膜 プラズマ支援CVD 大気圧プラズマ プラズマ診断 プラズマシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

現在、ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-Like Carbon; 以下 DLC) 膜は、高硬度、低摩擦、耐摩耗といった優れた機械的特性を有するため、自動車、金型、工具などにおいて DLC 膜の利用が拡大しつつある (図 1)。しかしながら、DLC 成膜速度の低さに起因する高コストがネックとなり、DLC 膜応用の潜在的な市場の一部しか顕在化していない。その際、世界的競争環境にある自動車業界などを中心に全面的に採用するには、従来の成膜速度をはるかに上回る超高速成膜 (100 $\mu\text{m}/\text{h}$) が強く要請されている。

これまで、数ある DLC 成膜方法として、プラズマ支援化学気相堆積 (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition; 以下 PECVD) 法が主に利用されており、高品質ならびに高速な成膜を目指して、実験と理論両面から精力的に研究開発がなされてきた。この PECVD 法は、気相中で低ガス圧のグロー放電プラズマを生成し、プラズマ中の高エネルギー電子を利用して低温下で原料ガスの炭化水素 (hidrocarbon ガス) を効率的に分解させ、生成される hidrocarbon ラジカル (化学的活性粒子) やイオンを DLC 成膜の材料源として基板上へ供給させる方法である (図 2)。ここで、上記自動車業界を初めとした産業界からの DLC 超高速成膜に対する要請に応えるためには PECVD 法の更なる最適化が急務となる。

その方策の 1 つとして、非平衡大気圧プラズマを利用した CVD (大気圧プラズマ支援 CVD) による DLC 成膜が注目を集めている。これは、非平衡大気圧プラズマのもつ、[1] 低ガス圧プラズマ生成時に必要な真空装置が不要、[2] 従来の低圧プラズマと比較して高い化学的反応性を有する、[3] 電極に対し径方向均一なプラズマが生成可能、などの利点を利用することで、DLC 成膜を超高速に大面積で処理する方法である。

しかし、この大気圧プラズマ支援 CVD 法を DLC 成膜に利用する場合の問題点として、[1] 大気圧プラズマ生成に起因する、DLC 膜の硬質化に寄与する基板へ入射するイオンエネルギーが大幅に減少に伴う軟質 DLC 成膜になりやすい (硬質な DLC 成膜が困難) であること、[2] 大気圧プラズマ中での反応過程が非常に複雑であり、基板上へ供給される炭化水素ラジカルおよびイオンの DLC 成膜に対する役割など未解明な部分が多いこと、が挙げられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、自動車業界を中心とした産業界において高硬度、低摩擦、耐摩耗などの優れた機械的特性を有する DLC 膜の超高速成膜へ向けた方策の 1 つとして大気圧炭化水素プラズマ支援 CVD 法に着目し、本方法による超高速 DLC 成膜が抱えている問題点を、大気圧プラズマシミュレーションおよ

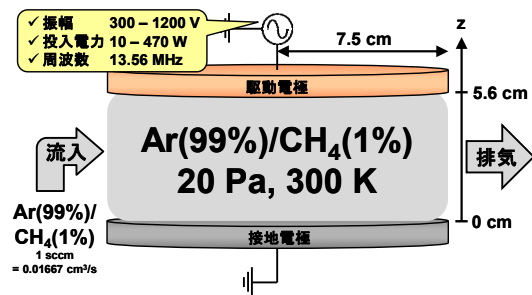


図 1 : DLC 成膜用炭化水素プラズマのモデル図

び実験・計測の両面から調査・検討し、得られた知見から大気圧プラズマ支援 CVD による超高速 DLC 成膜の制御指針を見いだすことを目的とする。本目的の下、DLC 成膜用炭化水素プラズマを研究対象とし、そのプラズマのモデリングおよびシミュレーションによる解析、およびラングミュアプローブ装置およびエネルギーアナライザ付き四重極質量装置による本プラズマの診断・計測を実施した。

3. 研究の方法

3.1 炭化水素プラズマのモデリング

本研究課題遂行にあたり、その手始めとして炭化水素ガスを原料ガスとした容量結合型プラズマの空間 2 次元 (軸対称 3 次元) 流体モデルを構築したので、本モデルを以下に概説する。

図 1 に、シミュレーションモデルの模式図を示す。2 枚の平板金属電極 (半径 7.5 cm) を 5.6 cm の間隔を空け平行に配置する。その際、両金属電極間で形成される空間 (放電プラズマ空間) に対し、原料ガスである Ar/CH₄(1%) 混合ガスが特定の流量で導入された状態を考える。その上で、両金属電極間に高周波電圧 (駆動周波数 13.56 MHz) を印加することにより、両電極間で径方向に均一な放電プラズマが生成されるとする。ここで、放電プラズマ空間内の全ガス圧力 20 Pa が一定に維持されるようにガス排気も考慮する。その上で、後述する支配方程式を数値的に解くことにより高周波炭化水素プラズマの時間空間的な振る舞いを求める。

本研究で適用した放電プラズマモデルは、疑似熱平衡近似 (電子エネルギー分布がマクスウェル分布に類似の分布であると仮定) に基づく空間 2 次元 (軸対称 3 次元) 流体モデルである。放電プラズマ中の各粒子種の振る舞いを流体として取り扱い、粒子数密度連続の式 ((1) 式と (2) 式)、ポアソンの式 ((3) 式と (4) 式)、電子エネルギー保存式 ((5) ~ (8) 式) の時間空間発展を数値的に解くことで放電プラズマのシミュレーションを行う。

本研究で適用した放電プラズマモデルは、疑似熱平衡近似 (電子エネルギー分布がマクスウェル分布に類似の分布であると仮定) に

基づく空間2次元（軸対称3次元）流体モデルである。放電プラズマ中の各粒子種の振る舞いを流体として取り扱い、粒子数密度連続の式、ポアソンの式、電子エネルギー保存式の時間空間発展を数値的に解くことで本炭化水素プラズマのシミュレーションを行う。ここで、原料ガスの導入および排気、対象となる粒子種に関する数密度連続の式における生成項および消滅項（滞在時間の形で考慮）でそれぞれ考慮している。

本プラズマモデルで考慮した粒子種は、特に重要である12種類の荷電粒子種 (e^- , Ar^+ , H^+ , H_2^+ , H_3^+ , CH_3^+ , CH_4^+ , CH_5^+ , $C_2H_2^+$, $C_2H_4^+$, $C_2H_5^+$, $C_2H_6^+$), 7種類の非ラジカル種 (Ar , H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8), 6種類のラジカル種 (Ar^* , H , CH , CH_2 , CH_3 , C_2H_5) をそれぞれ考慮した。それに加え、本モデルで考慮した本プラズマ中の反応過程は、上記12種類の荷電粒子種、7種類の非ラジカル種、6種類のラジカル種による電子衝突（運動量移行、解離（ラジカル生成）、電離など）、電子-イオン再結合、電荷交換、中性粒子間衝突から構成される約100種類の反応過程を考慮した。

3.2 炭化水素プラズマの診断・計測

前節の炭化水素プラズマのモデリング・シミュレーションのみならず、本研究課題においてはDLC成膜用炭化水素プラズマの計測も行った。その際、本プラズマを計測においては、ラングミュアプローブ装置およびエネルギーアナライザ付き四重極質量分析装置を用いた。前者においては、プラズマ密度、電子温度、電子エネルギー分布が測定可能であり、それに対して後者においては炭化水素プラズマ中からDLC成膜に寄与する基板への炭化水素イオンやラジカルの粒子種の同定、それら粒子種の入射量、これらに加え炭化水素イオンの入射する際のエネルギー分布を計測した。ここで、図2に本研究課題で実施した炭化水素プラズマ計測の実験システムを示す。本図から、上述のモデリングと同様に容量結合型の電極形状としている。金属電極間の脇からラングミュアプローブが挿入可能であり、それにより挿入位置における炭化水素プラズマ中の各種パラメータ（プラズマ密度、電子温度、電子エネルギー分布など）を測定することができる。また、接地電極の中心に質量分析用の穴（オリフィス、寸法 $100\ \mu\text{m}$ ）が開けられており、本炭化水素プラズマ中の各種粒子（イオン、非ラジカル、ラジカル）がこの穴を通じて導入され、質量分析が実施できるようになっている。これら装置を用いることによって、炭化水素プラズマ中の各種諸量を測定・診断することができ、これら諸量の入力電力、ガス圧力、ガス流量に対するこれら諸量の依存性を調査した。

4. 研究成果

本章では、本研究課題遂行を通じて得られたDLC成膜用炭化水素プラズマのモデリン

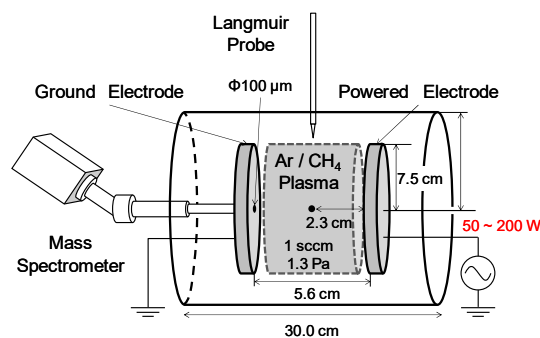


図2: DLC成膜用炭化水素プラズマの実験システム

グ・シミュレーションならびに計測・診断から得られた数多くの知見のうち、特に重要と考えられる本プラズマ中の各粒子種密度の時間空間的な振る舞い（4.1節）や、DLC成膜において極めて重要な情報である成膜用基板へ入射する各種炭化水素イオンやラジカルの粒子フラックス（入射量：イオンのカウント量）（4.2節）に焦点を絞り説明を行う。

4.1 炭化水素プラズマシミュレーションから得られた成果

図3に、DLC成膜用炭化水素プラズマ中の荷電粒子および中性粒子密度の電極間での空間分布を示す。ここで、全ガス圧力 $20\ \text{Pa}$ 、流量 $1\ \text{sccm}$ 、入力電力 $150\ \text{W}$ とした。また、比較のため、 $CH_4(100\%)$ と $Ar/CH_4(1\%)$ 混合ガスの同条件での解析結果を併記した。本図における荷電粒子密度の空間分布から、 $CH_4(100\%)$ の場合には炭化水素プラズマを構成するイオン種が非常に多岐にわたっていることが分かり、それらイオン種の中でも多量で存在するイオン種は $C_2H_4^+$ 、 $C_2H_2^+$ 、 $C_2H_5^+$ イオンといった2次の炭化水素イオン種であった。その際、本条件でのプラズマ密度は $5 \times 10^9\ \text{cm}^{-3}$ 程度であった。それに対して、 Ar で 99% 希釈した $Ar/CH_4(1\%)$ 混合ガスの場合には、本プラズマを構成するイオン種は Ar^+ イオンのみであり、炭化水素イオンは Ar^+ イオン密度の $1/100$ 以下程度で電極間中央部を中心に存在しているが、それらが及ぼす影響は低密度であるがゆえにほぼないことがわかる。次に中性粒子に着目すると、 $CH_4(100\%)$ の場合には電極間に存在する数多くの炭化水素種の中で原料ガスである $CH_4(100\%)$ とほぼ同程度にて存在していることがわかり、これら中性粒子種が本プラズマ生成に大きく関わっていることが示唆される。ラジカル種に関しては、最も高密度な種である CH_3 ラジカルが上記中性粒子種の $1/1000$ 程度の密度で存在しており、それに次いで CH_2 、 C_2H_5 、 CH の順で存在している。それに対して、 $Ar/CH_4(1\%)$ 混合ガスの場合には、原料ガスである Ar が電極間全体で最も高密度で存在しており、励起原子種である Ar^* が Ar の $1/1000$ 程度の密度で存在しており、炭化水素種は H ラジカルが Ar^* と同程度の密度で存在し、そ

れ以外の各種中性粒子種が H の更に 1/10 以下で存在していることがわかった。

図 4 に、DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板への各種炭化水素イオンおよびラジカルの入射量を示す。ここで、条件は図 3 と同じであり、比較のため、CH₄(100%)と Ar/CH₄(1%)混合ガスの同条件での解析結果を併記した。本図から、まずはイオン種に着目すると、CH₄(100%)時では、基板へ入射するイオン種が CH₃⁺、CH₄⁺、CH₅⁺といった 1 次の炭化水素イオンや、C₂H₂⁺、C₂H₄⁺、C₂H₅⁺、C₂H₆⁺といった 2 次の炭化水素イオンからなる多岐にわたる炭化水素イオン種が同程度で入射していることがわかる。それに対して、Ar/CH₄(1%)混合ガスの場合には、DLC 成膜に寄与する炭化水素イオンの種が CH₃⁺、CH₄⁺、C₂H₂⁺、C₂H₄⁺と非常に少なく、かつ入射量も少ない。次にラジカル種に着目すると、どちらの原料ガス種の場合においても基板に入射する炭化水素ラジカルにそれほど大きな差異がみられないことがわかった。

4.2 炭化水素プラズマ計測・診断から得られた成果

図 5 に、ラングミュアプローブ法による DLC 成膜用炭化水素プラズマ (Ar/CH₄(1%)混合ガス) 中の中心部でのプラズマ密度および電子温度の入力電力依存性を示す。ここで、全ガス圧力 1.3 Pa、流量 1 sccm、入力電力 50-200 W とした。本図から、本プラズマの中心部におけるプラズマ密度は本条件下では 10⁹ cm⁻³ オーダーであり、入力電力の増加に対しておおよそ入力電力の 1/2 乗で緩やかに増加傾向を示している。それに対して、電子温度はおおよそ 2 eV であり、入力電力に対する変化はほぼないことがわかる。

図 6 に、四重極質量分析による DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板への各種炭化水素イオンおよびラジカルの入射量を示す。ここで、条件は図 5 と同じであり、入力電力 50 W 一定である。本図から、本プラズマから基板へ入射する炭化水素イオン種に着目すると、CH₃⁺、CH₄⁺、CH₅⁺、C₂H₄⁺、C₂H₅⁺といったイオン種の存在が確認できる。これらは、前節での本プラズマのモデリング・シミュレーションで考慮した粒子種そのままである。本結果は、本研究課題で実施したシミュレーションの妥当性を示唆する証左を示していると考えられる。

図 7 に、四重極質量分析による DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板へ入射する各種炭化水素イオンのエネルギー分布を示す。ここで、条件は図 5 と同じであり、入力電力 50 W 一定である。本図から、本プラズマから基板へ入射する上述の炭化水素イオン種である CH₃⁺、CH₄⁺、CH₅⁺、C₂H₄⁺、C₂H₅⁺の入射エネルギーはイオン種におおよそよらずに約 25 eV であることがわかった。本報告書では割愛するが、イオン入射側の電極 (接地電極) に対して直流電圧印加によるバイアス効

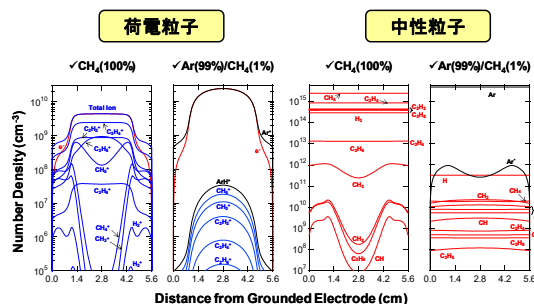


図 3 : DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の荷電粒子および中性粒子密度の電極間での空間分布 (CH₄(100%)と Ar/CH₄(1%)混合ガス) を併記)。

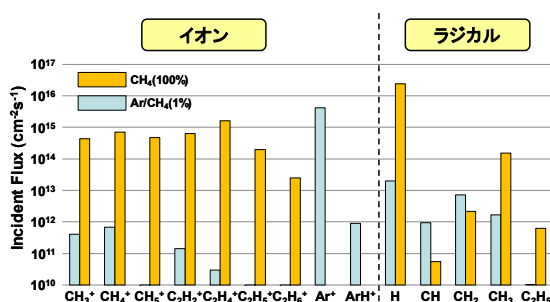


図 4 : DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板への各種炭化水素イオンおよびラジカルの入射量 (CH₄(100%)と Ar/CH₄(1%)混合ガス) を併記)。

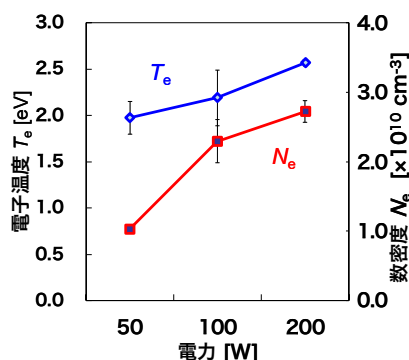


図 5 : ラングミュアプローブ法による DLC 成膜用炭化水素プラズマ (Ar/CH₄(1%)混合ガス) 中のプラズマ密度および電子温度の入力電力依存性

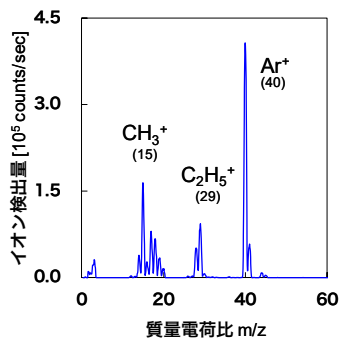


図 6 : 四重極質量分析による DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板への各種炭化水素イオンおよびラジカルの入射量

果を重畳することによって、基板へ入射するイオン種のエネルギーを制御可能であることも確認済みである。具体的には、50 Vの直流電圧の重畳により、最大 60 eV の入射エネルギーを達成した。

最後に、本研究課題遂行によって得られた成果を炭化水素プラズマのシミュレーションおよび炭化水素プラズマの診断の観点からそれぞれ以下に要約する。

(1) 炭化水素プラズマのシミュレーション

本研究課題では、(a)大気圧プラズマ、(b)メタンプラズマ、(c)テトラメチルシランプラズマのシミュレーションに関する研究を同時に遂行した。その結果、項目(a)に関しては、大気圧プラズマ生成において非常に重要となるグローからアーク放電への遷移機構の解明、そしてそれを通じた放電安定性の制御に関して解析を行った。その結果、プラズマ生成における電離増倍作用の影響が顕著になりすぎることによってアーク放電への遷移が始まることを解明し、その抑制のためには、負イオンを生成しやすい電気負性気体を少量混合させるなどの工夫が必要であることが明らかとなった。それに引き続き、項目(b)および(c)に関しては、現実的なチャンバ形状下でのシミュレーションにより、ダイヤモンドカーボン成膜に寄与する、基板への炭化水素ラジカルおよびイオンの入射量、それらの比が入力電力やガス圧力によりいかなる影響を与えるかを解明した。それにより、放電プラズマ生成条件を適切に設定することによって、所望の品質を有した成膜を実施できる可能性を見いだした。

(2) 炭化水素プラズマの診断

本研究課題では、アルゴン希釈された炭化水素ガス(メタン)中の容量結合型RFプラズマの基礎特性(基板へ入射する本プラズマ中で生成されるラジカル種やイオン種の同定、これらの存在比、入射イオンエネルギー分布の外部パラメータ依存性など)を四重極質量分析装置で、また本プラズマ中のパラメータ(プラズマ密度、電子温度)をラングミュアプローブ法に診断を行い、本プラズマの内部構造を調査した。その結果、ダイヤモンドカーボン膜の硬質化に寄与する、基板へ入射する炭化水素イオン種の質量スペクトルから、本プラズマ中の炭化水素イオン種は約 10 種類ほど存在しており、それらの中でも $C_2H_5^+$ イオンおよび CH_3^+ イオンの検出量が多いことが明らかとなった。その際、入射イオンエネルギーはおおよそ 25 eV 程度(無バイアス時)であった。したがって、外部条件を制御することで生成される炭化水素イオン種の量や存在比を適切に制御し、その上で基板へのバイアス印加によって入射イオンのエネルギーを適切に制御することで、膜の硬質化につながる基礎的な知見が得られ

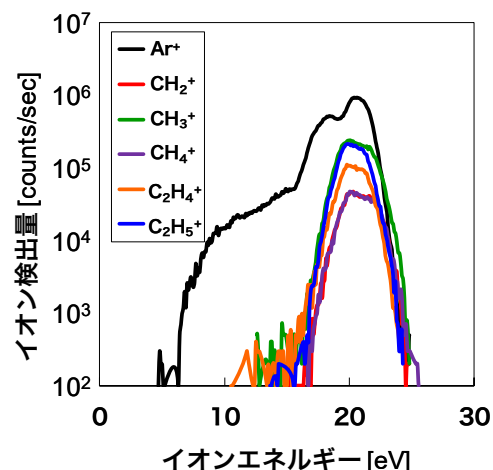


図7：四重極質量分析による DLC 成膜用炭化水素プラズマ中の基板へ入射する各種炭化水素イオンのエネルギー分布

た。

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 4 件)

- ① A. Oda and H. Kousaka, “Numerical Analysis of Substrate-Incident Carbon Flux in Low-Pressure Radio-Frequency CH_4 Plasmas for Deposition of Diamond-Like Carbon Films”, *Electronics and Communications in Japan*, 査読有, Vol.98, No.9, 2015, pp.31-39, DOI: 10.1002/ecj.11727
- ② Y. Suda, A. Oda, R. Kato, R. Yamashita, H. Tanoue, H. Takikawa, and R. Tero, “Computational study of temporal behavior of incident species impinging on a water surface in dielectric barrier discharge for the understanding of plasma-liquid interface”, *Japan. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.54, 2015, 01AF03, DOI: 10.7567/JJAP.54.01AF03
- ③ H. Akashi, T. Yoshinaga, A. Oda, “Recovery Mechanisms of Ozone Zero Phenomena by Adding Nitrogen and Nitrogen Monoxide in Atmospheric Pressure Oxygen Dielectric Barrier Discharges”, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 査読有, Vol.134, No.7, 2014, pp.460-465, DOI:10.1541/ieejfms.134.460
- ④ 明石治朗, 吉永智一, 小田昭紀, 「二次電子放出係数が大気圧酸素誘電体バリア放電に与える影響について」, *電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)*, 査読有, Vol.134, No.6, 2014, pp.410-415, DOI: 10.1541/ieejfms.134.410

[学会発表] (計 1 2 件)

- ① 大野祐也, 小田昭紀, 「質量分析及び

- ローブによる DLC 成膜用炭化水素プラズマの診断」, 平成 29 年電気学会全国大会, 1-109, 2017 年 3 月 16 日, 富山大学 五福キャンパス (富山県富山市)
- ② 大木一真, 小田昭紀, 「DLC 成膜用炭化水素プラズマ基礎特性に及ぼす希釈 Ar ガスの影響」, 平成 29 年電気学会全国大会, 1-108, 2017 年 3 月 16 日, 富山大学 五福キャンパス (富山県富山市)
- ③ 深井駿, 大野裕也, 小田昭紀, 「DLC 成膜用 Ar/CH₄ プラズマの質量分析およびプローブ診断」, 2017 年 第 64 回応用物理学学会秋季学術講演会, 14p-P1-7, 2017 年 3 月 14 日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
- ④ 大木一真, 小田昭紀, 「ダイヤモンドライクカーボン成膜用低圧高周波炭化水素プラズマの二次元流体シミュレーション」, 電気学会 プラズマ/パルスパワー/放電合同研究会, PST-16-081/PPT-16-061/ED-16-177, 2016 年 10 月 20 日, 佐賀大学 本庄キャンパス (佐賀県佐賀市)
- ⑤ 深井駿, 大野裕也, 小田昭紀, 「四重極質量分析法によるダイヤモンドライクカーボン成膜用炭化水素プラズマの診断」, プラズマ/パルスパワー/放電研究会, PST-16-082/PPT-16-062/ED-16-178, 2016 年 10 月 20 日, 佐賀大学 本庄キャンパス (佐賀県佐賀市)
- ⑥ A. Oda, K. Ohki, S. Kawaguchi, K. Satoh, H. Kousaka and T. Ohta, "Axially-symmetric Three-Dimensional Fluid Modelling of Capacitively-Coupled Radio-Frequency TetraMethylSilane Plasmas for Silicon-containing Diamond-Like Carbon Thin-Films Deposition", 15th International Conference on Plasma Surface Engineering, PO4014, 2016 年 9 月 15 日, Garmisch-Partenkirchen, Germany
- ⑦ 深井駿, 小田昭紀, 上坂 裕之, 太田 貴之, 「質量分析による DLC 成膜用 Ar/CH₄ プラズマの診断」, 2016 年 第 63 回応用物理学学会秋季学術講演会, 21p-P2-3, 2016 年 3 月 21 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都目黒区)
- ⑧ 大木一真, 小田昭紀, 「ダイヤモンドライクカーボン成膜用低圧高周波炭化水素プラズマのシミュレーション」, 平成 28 年電気学会全国大会, 1-054, 2016 年 3 月 16 日, 東北大学 川内北キャンパス (宮城県仙台市)
- ⑨ T. Ohta, K. Hattori, A. Oda, and H. Kousaka, "Non-contact temperature measurement of silicon substrate in sputtering plasma using optical interferometer", Proc. of International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-9)/Gaseous Electronics Conference (GEC 2015), GT1.00160, 2015 年 10 月 13 日, Hawaii Convention Center,

Honolulu, HI, USA

- ⑩ A. Oda, S. Fukai, H. Kousaka and T. Ohta, "Diagnostics of capacitively-coupled hydrocarbon plasmas for deposition of diamond-like carbon films using quadrupole mass spectrometry and Langmuir probe", Proc. of International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-9)/Gaseous Electronics Conference (GEC 2015), GT1.00074, 2015 年 10 月 13 日, Hawaii Convention Center, Honolulu, HI, USA
- ⑪ 深井駿, 小田昭紀, 上坂裕之, 太田貴之, 「ダイヤモンドライクカーボン成膜用炭化水素プラズマの質量分析およびプローブ診断」, 2015 年 第 76 回応用物理学学会秋季学術講演会, 15p-PB2-3, 2015 年 9 月 15 日, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋)
- ⑫ A. Oda, S. Kawaguchi, K. Satoh, H. Kousaka, T. Ohta, "Computational Study on Fundamental Properties in Capacitively-Coupled Radio-Frequency Tetramethylsilane Plasmas for Diamond-Like Carbon Film Coatings", Proc. of 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, G5.02, 2014 年 12 月 4 日, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, USA

[図書] (計 1 件)

- ① 表面技術協会 編 (小田昭紀, 他 23 名) コロナ社, 「ドライプロセスによる表面処理・薄膜形成の応用」, 2016, 318 ページ (52-60 ページ)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
なし
- 取得状況 (計 0 件)
なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.eee.it-chiba.ac.jp/staff/oda.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 昭紀 (ODA, Akinori)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号: 70335090