

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02481

研究課題名（和文）パラメータ分離型アーク放電による窒化ホウ素膜のsp結合制御と機能設計の研究

研究課題名（英文）Design of sp-bonds in functional BN films by arc discharge with independent parameter control

研究代表者

江利口 浩二（Eriguchi, Koji）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70419448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、反応性プラズマ支援成膜(RePAC: Reactive Plasma-Assisted Coating)法を用い、安定した様々なBN膜の構造制御の実現を目指した。RePACにおけるプロセスパラメータを変化させ、広範のsp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup>結合相を有するBN膜が作製できることを実証した。それらの物性を詳細に解析した結果、sp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup>結合相比に応じ、光学特性（消衰係数）やトンネルリーク電流が特徴的な振る舞いを示すことが明らかになった。加えて、電荷捕獲過程の違いも明らかになった。得られた知見は、RePACによるBN膜が、様々な機能素子へ実装できる可能性を有していることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な機能材料の高信頼性化には、材料中の原子間結合の制御が重要な工学的課題である。窒化ホウ素（BN）膜は、2Dから3D構造を取りうる特異な材料であるが、未だ幅広い工学的応用には至っていない。本研究では、高密度プラズマ源のプロセスパラメータの独立制御により、様々なsp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup>結合相比を有するBN膜形成を実現し、ナノネットワーク構造と光学特性（消衰係数）やトンネルリーク電流との相関解明を進めた。その結果、従来の機械特性に加え、sp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup>結合相比に応じて光学特性やトンネルリーク電流が制御できることが明らかになった。この事実は、将来の機能性BN膜実現に寄与する重要な知見である。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on designing functional BN films with various sp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup> bonding network using reactive plasma-assisted coating (RePAC) method where process parameters (e.g. the energy and flux of incident ions) are independently controlled. Stable BN/Si structures were fabricated with anti-delamination feature. It was found that the extinction coefficient and tunneling leakage current strongly depends on the sp<sup>2</sup>-sp<sup>3</sup> bonding phase. Time evolution of leakage current under constant voltage stress indicated characteristic electron trapping in the BN films. These findings imply that the RePAC system is one of the promising methods which realize functional BN films.

研究分野：ナノ材料信頼性物理学

キーワード：窒化ホウ素 プラズマ 結合状態 光学特性 電気特性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 基幹機能素子(デバイス)の高信頼性化は  $sp$  結合に代表される共有結合制御に基づく材料ナノ構造設計の必要性を意味する。近年、単一原子層材料(2D材料)が界面集合体への変化にも対応できる次世代機能素子材料として注目されている。その中で、理論的に最も化学安定で界面集合体への変化と調和する材料として窒化ホウ素(BN)が注目されている。

(2) BNは、 $sp^3$ 軌道系の立方晶 c-BN(3D)、 $sp^2$ 軌道系の六方晶 h-BN(2D)、アモルファス構造 a-BN など様々な形態をとりうる特異な材料である。c-BNは優れた機械的特性[1]、h-BNは優れた熱伝特性・電気的絶縁性[2]を有し、またエネルギー消費の小さいデバイスへの展開が大きく期待され[3]、さらに宇宙など極限環境分野でも注目されている。

(3) これまで超高硬化を目的とする c-BN に関する研究は機械工学分野(トライボロジー)で、高熱伝導・絶縁性を対象とする h-BN に関する研究はナノテクノロジー分野で各々のロードマップで進められてきた。前者は1990年代にプラズマプロセスによる成膜技術が精力的に研究されたが BN 膜界面剥離[4]のため幅広い実用化には至っていない。

(4) プラズマプロセスを用いた c-BN 形成技術では、入射イオンエネルギーの最適化が重要とされている。我々は反応性プラズマによる BN 薄膜形成方法(RePAC: Reactive Plasma-Assisted coating)を提案[5]し、2015年から基盤研究(B)15H04159の支援のもと、c-BN系/Si構造を実現し、プラズマ曝露環境下でのナノスケールでの表面構造変化をモデル化した。RePACによるBN膜中のc-BN-hBN混相比が、従来用いられたプロセスパラメータ;温度、ガス流量比、イオンエネルギー( $E_{ion}$ )だけでなく、イオンフラックス $\Gamma_{ion}$ にも依存する可能性があること、プラズマ中の残留水素、酸素にも依存することを見出した。

(5) プラズマプロセスによるBN形成では、高イオンフラックス供給技術を基盤とし、これらパラメータを独立に制御する技術が望まれてきた。しかしながらプラズマプロセスパラメータがBN膜系のバルク・界面物性に与える影響については、未だ科学的には十分に理解されていない。 $sp^3$ 結合から $sp^2$ 結合に至る幅広い組成をもつBN膜の本質的マクロ・ナノ物性とその変動機構の理解に迫る研究が望まれている。

### 2. 研究の目的

(1) 上記の学術的・技術的背景を鑑み、多様な次元をとり構造柔軟性が高い機能材料として広範な工学応用が期待されるBN膜を対象とする。RePACを用いた $E_{ion}$ と $\Gamma_{ion}$ の独立制御技術により、 $sp^3$ 結合から $sp^2$ 結合に至る幅広い組成をもつ、剥離のない安定したBN膜作製、さらには膜中の $sp$ 結合遷移の制御の実現を目指す。様々な $sp^2$ - $sp^3$ 結合混相系BN膜を作製し、RePACシステムでのプラズマパラメータと作製したBN膜中の $sp^2$ - $sp^3$ 結合比のマッピングを行う。

(2) BN膜中の $sp^2/sp^3$ 結合比(h-BN/c-BN組成比)に対して、光学特性(屈折率、消衰係数)、機械特性(硬度)および電気特性(トンネル電流)の理論的相関を明らかにする。またBN膜物性劣化にも着目する。作製した様々なBN膜に対して電気ストレス印加時のトンネル電流の時間発展を解析し、例えば膜中への電荷捕獲過程(の違い)を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) BN サンプル作製

RePACシステムによりSi基板上に種々のBN膜を形成した。RePACシステムの概要を図1に示す[6]。RePACシステムは成膜用チャンバーとホウ素蒸発チャンバーから構成される。ゲートバルブにて各チャンバーを隔離することができる。成膜は、各々のチャンバーで暖機運転を行った後に行う。成膜用チャンバーでは、熱フィラメントを通電した後、Arガスを導入しプラズマを形成し、暖機運転を施す。低バイアス条件でウエハ表面上の酸化膜層ならびに熱フィラメントから放出されウエハ表面に付着したタングステン(W)層を成膜直前に除去する。一方でホウ素蒸発チャンバーでは、電子ビーム用フィラメントを加熱し、ホウ素を融解し、ホウ素蒸発量を安定化させる。供給するホウ素フラックスは電子ビーム電流値( $I_{EB}$ )で制御する。特に断らない限り、 $I_{EB} = 250$  mA

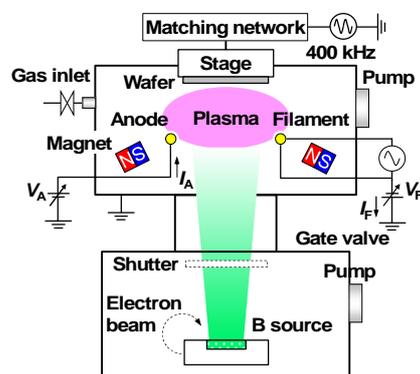


図1 反応性プラズマ支援成膜装置の概要

とした。暖機運転終了後、ゲートバルブを開放し、成膜ステップに移行する。永久磁石による磁場配位によってプラズマを閉じ込め、高密度化を図っている。標準の成膜条件を表1に示す。成

膜用チャンパーに Ar/N<sub>2</sub> ガスを導入し、下部チャンパーから供給されるホウ素 (B) と反応させ、Si 基板上に BN 膜を形成する。Ar イオンの照射を利用し、成膜中の表面層において、エネルギー・運動量移送により sp<sup>2</sup>→sp<sup>3</sup> 相転移を誘発する、というコンセプトで c-BN (sp<sup>3</sup>) 相を形成する。成膜中の圧力は 0.03 Pa とした。また、アノード電極に流入する電流値 (I<sub>A</sub>) によりプラズマ密度が制御できる。I<sub>A</sub> を増大させることでプラズマ密度を高めることが可能である。プラズマ密度はウエハ表面に入射するイオンフラックスを支配する。つまり、入射イオンフラックスは I<sub>A</sub> により制御可能である。表 1 に示すように、通常、c-BN 形成には高Γ<sub>ion</sub> 条件を採用している。

表 1 RePACでのBN成膜条件 (h-BNおよびc-BN)

Phase	I <sub>A</sub> (A)	Γ <sub>ion</sub> (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Q <sub>Ar</sub> /Q <sub>N2</sub> (sccm)	P <sub>pr</sub> (Pa)	V <sub>dc</sub>   (V)	I <sub>EB</sub> (mA)
h-BN	3.0	2.7 × 10 <sup>16</sup>	3/3	3.0 × 10 <sup>-2</sup>	70	250
c-BN	6.0	4.6 × 10 <sup>16</sup>				

一方で、成膜用チャンパー内のアノード電流伝導を、フィラメントからの熱電子放出機構と空間電荷制限電流機構からモデル化し、例えば窒素ラジカルフラックスを最大化するプロセス設計指針を提示している[7]。このことは、RePAC システムの実用化に向けた応用展開が可能であることを意味している。

## (2) BN 物性解析

BN 膜中の組成比はフーリエ変換赤外分光法 (FT-IR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy) で同定した。解析には JASCO TI/IR-4700 を用いた。これまで BN 膜は主にトライボロジー分野で高硬度被膜としての研究が精力的に行われてきた経緯がある。そのため、BN 膜の物性評価項目の1つとして、機械的硬さやヤング率が採用されてきた。本研究においても、RePAC で作製した種々の BN 膜の硬さをナノインデンテーション法で評価した。ナノインデンテーション硬さ評価には Elionix ENT-2100 を用いた。

光学特性は、エリプソ分光法を用いて解析した。基本光学構造モデルとして Tauc-Lorentz モデルを採用し、膜厚、屈折率、消衰係数を求めた。なお、詳細は省略するが、膜厚算出の妥当性については確認済である[8]。種々の BN 膜に対し、主に屈折率、消衰係数を評価した。

電気特性は水銀プローブを用いて解析した。水銀を電極とした金属 絶縁体 半導体系 (MIS) を構成し、電流 電圧特性を評価した。また、必要に応じて、BN 膜表面に電極を作製し、多数の MIS デバイス構造を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) BN 膜組成

RePAC により作製した BN 膜の FT-IR 解析結果を図 2 に示す。図 2 は、ウエハステージに印加する高周波電力印加によって形成される直流自己バイアス電圧 (V<sub>DC</sub>) の違いが、BN 膜中の sp<sup>2</sup>、sp<sup>3</sup> 結合相に与える影響を示している。図からわかるように、V<sub>DC</sub> の絶対値増加に伴い sp<sup>2</sup> と sp<sup>3</sup> 結合相の比が変化している。バイアスなし (すなわちプラズマポテンシャル分のエネルギーを持ったイオンが照射している状態) の条件では、sp<sup>2</sup> 結合相のみ (すなわち h-BN) が観測されている。また V<sub>DC</sub> = -150 V では sp<sup>3</sup> 結合相の存在が確認できる。これは図 2 の右に示す透過電子顕微鏡観察像 (TEM) から確認できる。さらに |V<sub>DC</sub>| を増加させると sp<sup>3</sup> 結合相を示すピークが消失することがわかる。つまり BN 膜中の sp<sup>3</sup> 結合相は特定の V<sub>DC</sub> 値の領域で形成されることがわかる。これらは従来報告例[4][5]と一致する。一方で、高 E<sub>ion</sub> 条件下 (V<sub>DC</sub> = -250 V) では、sp<sup>3</sup> 結合相が観測されなくなる。イオン衝撃による sp<sup>3</sup> 結合相の破壊 (結合切断) が要因と考えられ、これまで報告されている V<sub>DC</sub> 値[5]とは異なることがわかった。

そこで、図 2 とは異なる条件で成膜した種々の BN 膜に対して FT-IR 解析を実施した。その結果を図 3 に示す。図 3 は、E<sub>ion</sub>、Γ<sub>ion</sub> 依存性に着目した結果である[6]。図 3 左では、I<sub>A</sub> = 6 A に固定した時の V<sub>dc</sub> (= V<sub>DC</sub>) 依存性である。図 2 と同様、特定の V<sub>dc</sub> において sp<sup>3</sup> 結合相が観測されることがわかる。また図 3 右は、様々な I<sub>A</sub> に対する FT-IR 解析結果である。同じ V<sub>dc</sub> であっても、I<sub>A</sub>、すなわち Γ<sub>ion</sub> が異なれば、sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 結合相の異なる BN 膜が形成されることがわかる。このように、RePAC システムにより、BN 膜中の sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 結合相が制御できることがわかった。特に、従来から報告されている E<sub>ion</sub> のみ

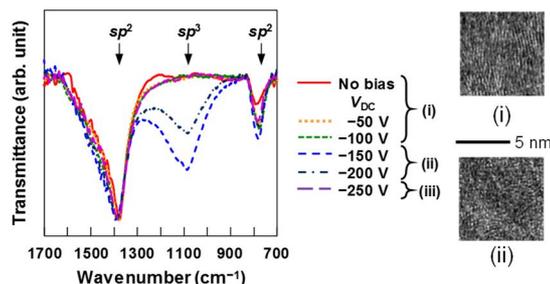


図 2 RePACにより作製したBN膜のFTIRスペクトルおよび典型的なTEM観察像

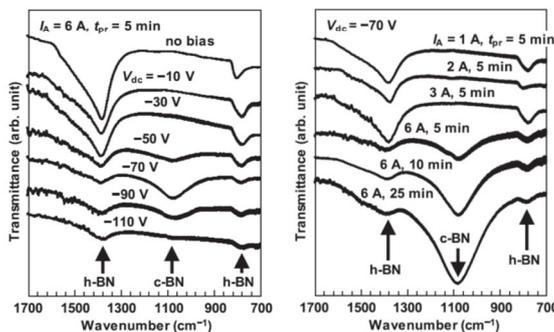


図 3 RePACにより作製したBN膜のFTIRスペクトル (左) E<sub>ion</sub>依存性、(右) Γ<sub>ion</sub>依存性

ならず、 $\Gamma_{ion}$ を制御することで多様なBN膜形成が可能であることが明らかになった。図4にその結果(マッピング)を示す。縦軸に $I_A$ 、横軸に流量比をとり、BN膜中の主な組成をh-BN、c-BNとして分類している。高 $\Gamma_{ion}$ 条件であれば、幅広いガス流量比条件でc-BN組成を主とするBN膜が形成できることがわかった。

### (2) 光学特性

エリブソ分光法により同定した種々のBN膜の屈折率、消衰係数の例を図5に示す。ここでは、図2と同様のプロセス条件で作製したBN膜に対する結果を一例として示している。同様の傾向は、他のBN膜についても得られている。屈折率と消衰係数は一対一の対応関係があるので、本質的に等価な評価を行っていることになるが、図5から、以下の特徴的な事実がわかる。バイアスなし(No bias)の条件では、消衰係数の立ち上がりが高エネルギー側に位置し、 $|V_{DC}|$ 増加とともに、低エネルギー側にシフトしている。つまり、光学遷移中の電子再結合中心準位密度が、 $|V_{DC}|$ 増加とともに増大していることを示唆している。 $|V_{DC}|$ が100V程度までの $sp^2$ 結合相が主のBN膜と、 $|V_{DC}|$ が200V程度までの $sp^3$ 結合相を含むBN膜では、消衰係数の立ち上がりの違いは明確には確認できないが、屈折率の光子エネルギー依存性には違いがより明瞭に見られる。さらに $|V_{DC}|$ が増加すると、消衰係数の立ち上がりが2.0 eV以下になっている。図2の結果を鑑みると、これは、高エネルギーイオン照射による $sp^3$ 結合相の破壊(結合切断)が要因と考えられる。つまり、これら切断された結合が、光学的電子遷移の再結合中心として働き、見かけ上、光学的電子遷移過程のエネルギーギャップが縮小したためであると考えられる。これらの実験事実は、ウエハステージへの投入電力によりBN膜の光学定数を制御できることを示唆している。

### (3) 機械特性(硬さ)

BN膜はハードコーティングとして働く重要な材料として注目され、BN膜物性は主に、機械的硬さを指標に議論されてきた。図6にRePACで作製した種々のBN膜のナノインデンテーション硬さのマッピング例を示す。横軸を膜厚とし、これまでのc-BNに対する報告例("Reported")も併せて載せている[8]。図からわかるように、RePACを用いれば、0.8~80 GPaの範囲でBN膜のナノインデンテーション硬さを制御できると言える。なお、80 GPaを有するBN膜の一部は、ナノインデンテーション硬さ解析後に剥離した。現在、剥離機構についても既に検討を開始している[9]。剥離機構は確率的要素も含まれるため、100  $\mu\text{m}$ スケールのMISデバイス構造を作製し、多数のデバイスを用いたBN膜の特性解析を進めている。トンネルリーク電流値および微分電気容量の経時的変化から、BN膜剥離機構を検討している[9]。さらに、マイクロスケールの凹凸をSi基板を作製し、表面トポロジーの違いによるBN膜物性の違いや剥離防止の効果を検討している。特に凹構造内に作製したc-BNでは基板密着性が向上し、物性解析に有効であることが確認できている。

### (4) 電流 電圧特性

図7に種々のBN膜の電流電圧特性の結果を示す。ここでは、図2と同様のプロセス条件で作製したBN膜に対する結果を一例として示している。同様の傾向は、他のBN膜についても得られている。縦軸にトンネル電流値、横軸にBN膜に印加する電界強度をとっている。図から、 $|V_{DC}|$ 値に伴いトンネル電流値ならびにその電界強度依存性が変化していることがわかる。バイアスなしの条件では、Fowler—Nordheim伝導機構に対応する電子伝導が観測され、 $|V_{DC}|$ 増加に伴い、トンネル電流が増加し、その後、高 $|V_{DC}|$ 領域では再び減少に転じている。この領域はPoole—Frenkel伝導機構であることが確認されている。上

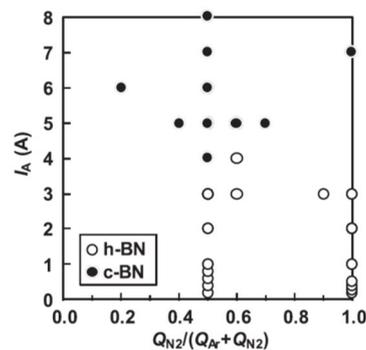


図4 BN膜中のh-BN/c-BNマッピング

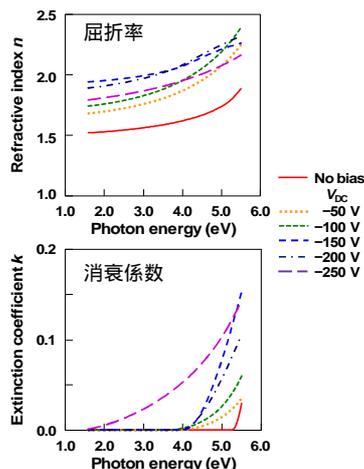


図5 RePACにより作製した種々のBN膜の光学特性

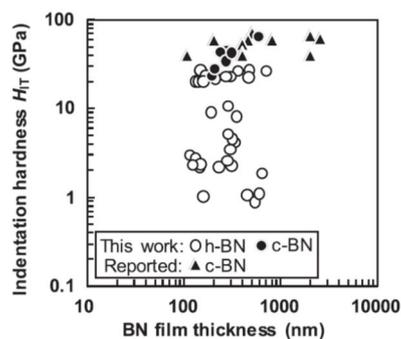


図6 RePACにより作製した種々のBN膜のナノインデンテーション硬さマップ

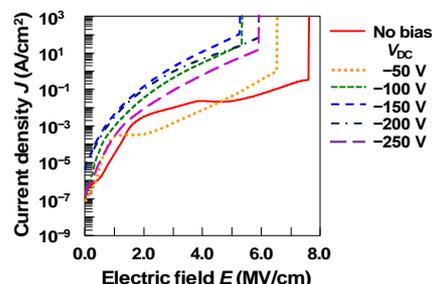


図7 RePACにより作製した種々のBN膜のトンネル電流解析結果

記で議論した事実、 $|V_{DC}|$ 値がBN膜中の $sp^2/sp^3$ 結合相比を決定づけることを鑑みると、この伝導機構の変化は $sp^2/sp^3$ 結合相比に起因するものと考えられる。一方で、図5の結果から、 $V_{DC} = -250$  Vでは、光学的電子遷移のエネルギーギャップの減少、あるいは $sp^3$ 結合相の破壊（結合切断）が予想されるが、電気特性解析からは、そのようなBN膜（h-BN）は逆に絶縁性が高いと言える。

#### (5) 定電圧ストレス印加のトンネル電流変化

図7で示したBN膜に、電界強度4 MV/cmとなる一定電圧を印加し、ストレス時のトンネル電流値の時間発展を示したものが図8である。ここでは、図2と同様のプロセス条件で作製したBN膜に対する結果を一例として示している。一定電圧ストレス印加時のトンネル電流変化は、絶縁膜中での注入電子と膜中の原子結合ネットワークとの相互作用による電子捕獲過程および新たな形成された欠陥への電子捕獲過程を示すものである。注入電子が欠陥プリカーサーに捕獲される、あるいはストレスによって形成された欠陥に捕獲されると、実効的なポテンシャルバリアが上昇し、一般にはトンネル電流値は減少する。この機構は、絶縁膜の信頼性評価として、最先端半導体デバイス設計で広く応用されている。図8で示すように、同様の手法を用い、RePACで作製した種々のBN膜を解析した。その結果、図7において顕著な絶縁性を示すBN膜（バイアスなしと $V_{DC} = -50$  V）について、一般的な $SiO_2$ 膜と同様の傾向が観測されることがわかった。すなわち、BN膜の電気的信頼性は、 $SiO_2$ 膜など同様の機構で支配されていると考えられる。

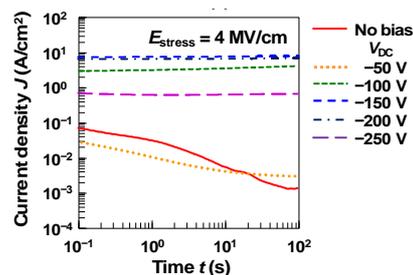


図8 RePACにより作製した種々のBN膜の定電圧印加時のトンネル電流時間発展

#### (6) 得られた知見と今後の展望

本研究では、RePACによる様々なBN膜を作製し、その物性・信頼性を詳細に解析した。入射イオンエネルギーのみならず、入射イオンフラックスを制御することで、広範の物性（ $sp^2$ - $sp^3$ 結合相、光学特性、機械特性、電気特性、電気的信頼性）を有するBN膜作製が実証された。ナノテクノロジーで広く利用されている絶縁膜を対象とした解析手法により、BN膜の特徴をより科学的に理解できることがわかった。またRePACの特徴である高密度イオンフラックス照射効果を更に実証するために、新たなチャンバーを設計し立ち上げを完了している。現在、より高性能・高信頼性を有するBN膜プロセス開発を進めている。今後、RePACによるBN膜物性がどのようなナノネットワーク構造、 $sp^2$ 、 $sp^3$ 結合相により支配されているのか？について研究を進める予定である。

#### <引用文献>

- [1] Y. Tian, B. Xu, D. Yu, Y. Ma, Y. Wang, Y. Jiang, W. Hu, C. Tang, Y. Gao, K. Luo, Z. Zhao, L.-M. Wang, B. Wen, J. He, and Z. Liu, "Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride," *Nature* **493**, pp. 385–388 (2013).
- [2] Z. Liu, Y. Gong, W. Zhou, L. Ma, J. Yu, J. C. Idrobo, J. Jung, A. H. MacDonald, R. Vajtai, J. Lou, and P. M. Ajayan, "Ultrathin high-temperature oxidation-resistant coatings of hexagonal boron nitride," *Nature Communications* **4**, 2541 (2013).
- [3] Y. Hattori, T. Taniguchi, K. Watanabe, and K. Nagashio, "Comparison of device structures for the dielectric breakdown measurement of hexagonal boron nitride," *Appl. Phys. Lett.* **109**, 253111 (2016).
- [4] C. B. Samantaray and R. N. Singh, "Review of synthesis and properties of cubic boron nitride (c-BN) thin films," *Int. Mater. Rev.* **50** pp. 313–344 (2005).
- [5] M. Noma, K. Eriguchi, Y. Takao, N. Terayama, and K. Ono, "Structural, mechanical, and electrical properties of cubic boron nitride thin films deposited by magnetically enhanced plasma ion plating method," *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 03DB02 (2014).
- [6] T. Matsuda, T. Hamano, Y. Asamoto, M. Noma, M. Yamashita, S. Hasegawa, K. Urabe, and K. Eriguchi, "Ion irradiation-induced sputtering and surface modification of BN films prepared by a reactive plasma-assisted coating technique," *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, S11014 (2022).
- [7] 朝本雄也, 濱野誉, 松田崇行, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二: 「結合状態を制御した窒化ホウ素膜の高速堆積に向けた窒素ラジカルフラックス最大化に関する研究」, 第83回応用物理学会秋季学術講演会, 2022年9月20日~23日, 23a-B101-4.
- [8] T. Hamano, T. Matsuda, Y. Asamoto, M. Noma, S. Hasegawa, M. Yamashita, K. Urabe, and K. Eriguchi, "Spectroscopic ellipsometry characterization of boron nitride films synthesized by a reactive plasma-assisted coating method," *Appl. Phys. Lett.* **120**, 031904 (2022).
- [9] 松田崇行, 濱野誉, 朝本雄也, 野間正男, 山下満, 長谷川繁彦, 占部継一郎, 江利口浩二: 「電気伝導機構解析による窒化ホウ素膜/Si構造の剥離機構の検討」, 第69回応用物理学会春季学術講演会, 2022年3月22日~26日, 25p-E104-10.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takashi Hamano, Takayuki Matsuda, Yuya Asamoto, Masao Noma, Shigehiko Hasegawa, Michiru Yamashita, Keiichiro Urabe, and Koji Eriguchi	4. 巻 120
2. 論文標題 Spectroscopic ellipsometry characterization of boron nitride films synthesized by a reactive plasma-assisted coating method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 031904 ~ 031904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077147	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 Takayuki Matsuda, Takashi Hamano, Yuya Asamoto, Masao Noma, Michiru Yamashita, Shigehiko Hasegawa, Keiichiro Urabe, and Koji Eriguchi	4. 巻 61
2. 論文標題 Ion irradiation-induced sputtering and surface modification of BN films prepared by a reactive plasma-assisted coating technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 S11014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5d16	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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Asamoto, T. Matsuda, T. Hamano, M. Noma, S. Hasegawa, M. Yamashita K. Urabe, and K. Eriguchi
2. 発表標題 Characterization of carrier conduction in a magnetically-confined vacuum arc discharge and its application to control of incident-ion flux to a substrate
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process: DPS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Matsuda, T. Hamano, Y. Asamoto, M. Noma, S. Hasegawa, M. Yamashita K. Urabe, and K. Eriguchi
2. 発表標題 Controlling of nano-network structures in BN films by a reactive plasma assisted-coating technique and the sputtering characteristics against plasma exposure
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process: DPS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝本雄也, 松田崇行, 濱野誉, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 反応性プラズマ支援成膜法に用いる熱電子供給型アーク放電の発光分光法を用いた電離機構解析
3. 学会等名 第38回プラズマプロセッシング研究会 / 第33回プラズマ材料科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hamano, T. Matsuda, Y. Asamoto, M. Noma, S. Hasegawa, M. Yamashita, K. Urabe, and K. Eriguchi
2. 発表標題 Characterization of nano-network structure transition of boron nitride films by ion irradiation during the film growth
3. 学会等名 43rd International Symposium on Dry Process: DPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱野誉, 松田崇行, 朝本雄也, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 ナノネットワーク構造解析に基づく微細トレンチ内の窒化ホウ素膜特性予測
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱野誉, 松田崇行, 朝本雄也, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 反応性プラズマ支援成膜法による窒化ホウ素膜のナノネットワーク構造制御
3. 学会等名 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 第242回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 朝本雄也, 濱野誉, 松田崇行, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 結合状態を制御した窒化ホウ素膜の高速堆積に向けた窒素ラジカルフラックス最大化に関する研究
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田崇行, 濱野誉, 朝本雄也, 野間正男, 山下満, 長谷川繁彦, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 電気伝導機構解析による窒化ホウ素膜/Si構造の剥離機構の検討
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱野誉, 松田崇行, 朝本雄也, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 sp結合ナノネットワーク構造変化に起因する窒化ホウ素膜特性遷移の解析
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 朝本雄也, 松田崇行, 濱野誉, 野間正男, 長谷川繁彦, 山下満, 占部継一郎, 江利口浩二
2. 発表標題 熱電子供給型真空アーク放電の放電電流決定機構に基づくプロセス制御(II)
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学 航空宇宙工学専攻 推進工学分野（江利口研）  
<http://www.propulsion.kuaero.kyoto-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
研究協力者	占部 継一郎  (Urabe Keiichiro)		
研究協力者	野間 正男  (Noma Masao)		
研究協力者	長谷川 繁彦  (Hasegawa Shigehiko)		
研究協力者	山下 満  (Yamashita Michiru)		

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