

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03810

研究課題名(和文) 反射電界型エネルギー分析器による基板入射イオンエネルギー分布の測定

研究課題名(英文) Measurement of ion energy distribution incident on substrate by retarding field energy analyzer

研究代表者

松田 良信 (Matsuda, Yoshinobu)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60199817

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)：金属添加酸化亜鉛ターゲットのマグネトロンスパッタリングにおける基板入射負イオンのエネルギー分布関数を、磁場領域を持つ反射電界型エネルギー分析器(RFEA)を用いて測定した。RFEA入射開口部前方の直交磁界で、バルクプラズマ電子のRFEAへの流入が劇的に抑制されるが、酸化物ターゲット表面から放出される負イオンの流入はほとんど影響されない。負イオンは主にターゲット侵食領域から放出され、ターゲット印加電圧と同等のイオンエネルギーで対向基板に入射することが確認された。銅ターゲットのマグネトロンスパッタリングでは負イオンの信号は全く観測されない。磁化RFEAは安価でコンパクトで、空間掃引が容易である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁化反射電界型エネルギー分析器(Retarding field energy analyzer: RFEA)を用いて、酸化物ターゲットのマグネトロンスパッタリング過程で酸素負イオンがターゲット表面から放出され高エネルギーで基板に入射することを明らかにした。差動排気を必要とし、大型で携帯性に劣るエネルギー分解型質量分析器に比べ、RFEAは安価でコンパクトで空間掃引が容易である。磁化RFEAは、成膜やエッチングなどの様々なプロセス環境下での正・負イオンの測定に展開可能である。半導体プロセスを含む各種真空・表面処理プロセスの診断・制御に、磁化RFEAを有効活用することで、社会に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The energy distribution function of the substrate incident negative ions during the magnetron sputtering process of a metal-doped zinc oxide target was measured using a home-made retarding field energy analyzer (RFEA) with a magnetic field region. In the crossed magnetic field region ahead of the RFEA incident aperture, the bulk electron inflow into the RFEA is dramatically suppressed, while the inflow of negative ions emitted from the oxide target surface is hardly affected. Negative ions are emitted mainly from the target erosion region and are observed to enter the oncoming substrate with ion energy equivalent to the target applied voltage. Since no negative ion signal is observed at all in the magnetron sputtering of the copper target, the emission of oxygen negative ions was definitely observed. Compared to energy-resolved mass spectrometers, magnetized RFEA is inexpensive, compact, and easy to sweep in space, although it does not provide mass separation.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：負イオン イオンエネルギー分布 反射電界型エネルギー分析器 磁気フィルタ マグネトロン スパッタリング 透明導電膜 金属添加酸化亜鉛

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

透明導電性酸化物(TCO)薄膜は、フラットパネルディスプレイ(FPD)や太陽電池の透明導電極、赤外線反射膜、タッチパネルなどとして近年需要が拡大している。TCOの主要材料は、成膜が容易で優れたパターンニング加工性を有し、可視域での高い透過率と最も低い抵抗率を実現できるスズ添加酸化インジウム In_2O_3 (ITO)であるが、その主要構成元素であるInは希少金属であり、ITOの粉末は生体に有害であるため、生体安全性と省資源・低コストという利点から、AlやGaなどの金属を添加した酸化亜鉛(ZnO)がITOの代替材料として有望視されている。しかし、現在 ZnO 系TCOは、ITOが利用できない還元性環境下での用途を中心に一部は実用に供されているが、低抵抗で大面積を必要とするFPD用途ではまだITOを凌駕するに至っていない。我々は、これまで金属添加 ZnO を対象として、直流マグネトロンスパッタ(DCMS)、容量結合高周波スパッタ(RFMS)、容量結合プラズマ重畳直流マグネトロンスパッタ(CCP重畳DCMS)、誘導結合プラズマ支援直流マグネトロンスパッタ(ICP支援DCMS)に取り組んできた。その結果、RFMSで、動作気圧1Paで基板温度350℃のとき、基板端部で 5×10^{-4} cm台の低抵抗率が得られるが、ターゲット浸食領域の対向部では抵抗率が約一桁以上高くなり、抵抗率の不均一が避けられないことがわかった。一方、基板を中心軸から遠ざけ(軸外し)、垂直および斜めに設置することで、また、ICP支援DCMSを利用することで、意図的な基板加熱なしでも 1×10^{-3} cm程度の抵抗率のAl添加 ZnO 膜を空間均一性良く形成できることを確認した。酸化物ターゲットのスパッタリング成膜過程の理解には、酸素負イオンを含めた基板に入射する粒子束・エネルギー分布のより詳細な理解が必要である。

酸化物ターゲット浸食領域の対向部で膜質が劣化する原因が酸素負イオンであることは、IBMワトソン研究所のS. M. RossmagelとJ. J. Cuomoにより、1988年に初めて指摘された。彼らは、 YBaCuO 高温超伝導酸化物のスパッタリングにおいて、その現象を最初に見出している。それ以降、エネルギー分析機能を有する質量分析器(HIDEN社製品など)の進展により、様々な酸化物ターゲットのスパッタリング過程で種々の高エネルギー負イオンが対向基板に入射することが、日米欧の複数の研究者らにより詳細に報告されるようになってきている。しかし、エネルギー分解質量分析装置は作動排気のための真空設備を要することから、空間分布を測定するための空間スキャンが難しいなど、取り扱いも容易でない。そこで、スパッタリング成膜環境下での基板入射負イオンのエネルギー分布を、簡便に計測する方法として、古くから利用されてきた反射電界型エネルギー分析器(RFEA)の利用に着目した。

古くは、直流放電の陰極に入射する正イオンのエネルギー分布関数(EDF)の測定が、DavisとVandersliceによってエネルギー分解質量分析器を用いて1963年に行われた。RF放電中の基板入射正イオンEDFは1972年にCoburnとKayにより報告された。国内ではOkamotoとTamagawaによる報告が1970年になされた。それ以来、グロー放電やマグネロン放電中の正イオンのエネルギー分布関数の測定は、数多くの研究者らにより、静電偏向分析器や円筒ミラー分析器や反射電界型エネルギー分析器(RFEA)などを用いて数多く行われてきた。しかし、マグネロン放電中の酸素負イオンのEDF測定についてはずいぶん遅く、1998年にZeunerらによってSiターゲットのAr/O₂反応性マグネトロンスパッタリング中で測定された。その後、金属ターゲットの反応性マグネロン放電中の負イオンのEDF測定結果が、2006年にMrazとSchneiderにより、また2007年にMahieuとDeplaにより報告されている。透明導電性酸化物(TCO)ターゲットのマグネトロンスパッタリングプロセス中の正イオン・負イオンのEDF測定は2007年以降、ElmerとWelzelらにより行われてきた。これらのほとんどはエネルギー分析器付き四重極質量分析器を用いて行われた。国内では、青山学院大学の重里博士らが InGaZnO のDCマグネトロンスパッタリングにおいて、酸素原子負イオンや金属酸化物負イオン分子が放出されること、主要負イオンは酸素原子負イオンであること、酸素原子負イオンのEDFは陰極ターゲットのバイアス電圧を反映したピーム状のものであること、酸素原子負イオンのシグナルはターゲット浸食領域の対向部周辺で観測されることなどを、静電エネルギー分析器付き四重極質量分析器を用いて2013年に詳細に報告している。名古屋大学グループは MgO のRFMS中で酸素負イオンの測定を行った。一方古くから放電・プラズマ・核融合研究の基本的なイオンEDFの測定に利用されてきたRFEAは近年ではimpedens社により市販されており、プロセスプラズマの診断に幅広く活用されている。しかし、本研究で実施しようとしているRFEAを負イオンのEDF測定に利用するという例は、本研究の開始当時は、D. Rafalskyi, S. Dudin, A. Anniesland等による宇宙推進用イオン源における負イオンのEDF計測がある程度で、ほぼ皆無であった。

2. 研究の目的

本研究の究極の目的は、「なぜ、ターゲット浸食領域の対向部で透明導電膜の膜抵抗率が高くなるのか？基板入射粒子の種類とエネルギー分布関数がスパッタ膜の特性にどのように影響するのか？」という学術的問いに対する答えを見出すことである。そのために、酸化物ターゲットから放出され基板損傷の主要因と考えられる酸素負イオンを簡便かつ正しく測定するためにRFEA前方に直交磁界領域を設けた、いわゆる、磁化RFEAを開発し、それを用いた負イオンのEDF計測を実施し、磁化RFEAを用いた負イオン計測法を開発することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

単なる RFEA だけでは、電子と負イオンを分離することが難しいので、RFEA 前方に交差磁場領域を設け、ラーマ半径の違いを利用して RFEA への電子流入を大幅に抑制することにより、極わずかな酸素負イオンの流入束を明確に観測できるようになる。実験では、3つのグリッド電極 (ER: electron repeller, D: discriminator, CR: collector repeller) とコレクタ C からなる自作 RFEA ユニットを用いた。図 1 に磁気フィルタ付き RFEA の断面図を示す。直径 3mm の入口開口から RFEA ヘッドに入った正負荷電粒子は、それぞれの電極に適切な電圧をかけることでエネルギー弁別され、コレクタ電流として検出される。図中には詳細を省略しているが、各グリッド電極は、500 mesh/inch のステンレス製メッシュと内径 6mm の開口部を有するステンレス板で構成された。各電極間は、内径 10 mm の 130 μ m 厚のプラスチック板 (polyethylene naphthalate: PEN) 用いて絶縁した。これらのグリッド電極と C 電極は、アルミニウム製筐体に組み込まれたセラミックス製絶縁ブロック内に組み込んだ。

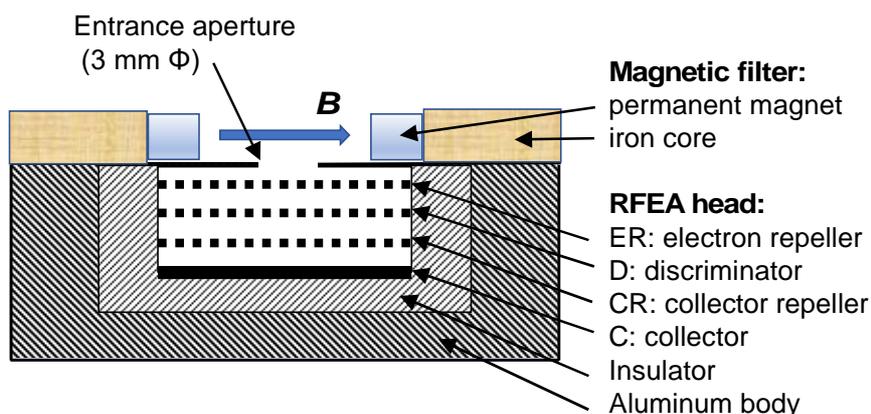


図 1 磁気フィルタ付き RFEA の断面構造

負電荷粒子の EDF を 3 枚グリッド RFEA で測定する場合の、RFEA 各電極への電圧バイアスの典型的な一例を表 1 に示す。D 電位を -500V から +50V に変化させて C へ流れる電流を測定し、C 電流波形を D 電位で微分して荷電粒子の EDF を導出した。

表 1 負荷粒子測定時の 3 グリッド RFEA の各電極への印加電圧

Electrode	Applied voltage [V]
Electron repeller	floating
Discriminator	-500 50
Collector repeller	60
Collector	100

電子抑制用磁気フィルタは、55mm × 50mm × 6mm の直方体鉄ブロックの中央を内枠 30mm × 20mm で削り抜き、内壁面上に永久磁石 (NdFeB, SmCo) を取り付けただけの簡易構造物である。寸法の制約から電磁石の利用は避けた。永久磁石の寸法と種類を変更することで中心磁束密度を 0, 100, 180, 200, 400, 550, 720 G で可変である。磁束密度の空間分布はホールセンサでの実測と 2 次元 FEM 解析により把握した。

図 2 にプレーナーマグネトロンスパッタリング成膜装置の模式図を示す。ターゲットには、Ga₂O₃ を 2wt% 含んだ ZnO ターゲット (直径 3 インチ) もしくは Al₂O₃ を 2wt% 含んだ ZnO ターゲット (直径 2 インチ) を用いた。動作圧力を 1Pa として、DC マグネトロンスパッタリング (DCMS) と RF マグネトロンスパッタリング (RFMS) を切り替えることができる。

EDF の径方向位置依存性を測定するため、RFEA ヘッドはマグネトロンターゲット表面から 38 mm 離れた位置に保たれ、直動マニピュレータで放電中心軸から半径方向 40mm まで可動である。ファンクションジェネレータで発生した三角波をパイプアンプで増幅した後ディスクリミネーターに印加し、その D 電圧とコレクタ電流をデジタルマルチメータで読み取りパソコンに記録し、解析した。EDF の放電電力依存性、EDF の動作気圧依存性、DCMS 中と RFMS 中における EDF の違い、永久磁石を利用した電子遮蔽磁気フィルタを用いた場合の EDF に及ぼす磁束密度の影響、酸素原子を含む ZnO ターゲットと酸素原子を含まない銅ターゲットでのマグネトロン放電における負荷電粒子の EDF の違いなどを調査した。

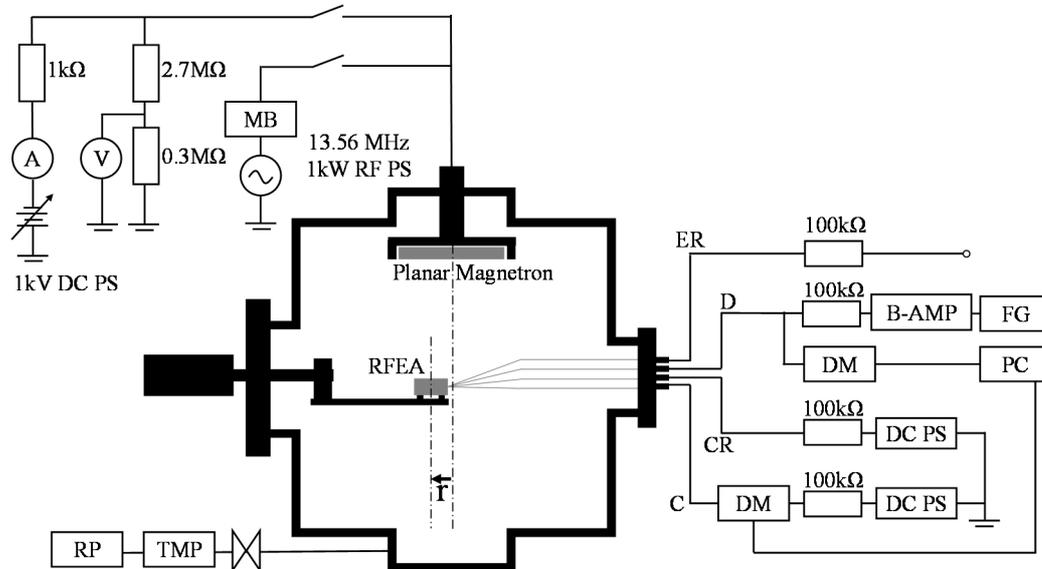


図2. マグネトロンスパッタリング装置とRFEAによるエネルギー分布関数測定の実験配置図。図中の略号とその正式名称は、以下の通りである。A: 電流計, B-AMP: バイポーラアンプ, DC PS: 直流電源, DM: デジタルマルチメーター, FG: ファンクションジェネレータ, MB: マッチングボックス, PC: パーソナルコンピューター, RF PS: 高周波電源, RP: ロータリーポンプ, TMP: ターボ分子ポンプ, V: ボルトメーター。

4. 研究成果

図3は、3インチ Ga 添加酸化亜鉛ターゲットの 1 Pa, 4W DCMS 中で、磁気フィルタの中心磁束密度が 180 G のときの EDF の半径方向変化である。横軸はディスクリミネーター電圧であり、ディスクリミネーター電圧の絶対値が大きい位置ほど高エネルギーである。D 電圧が 0 ボルト付近に低エネルギー成分がみられるが、これはバルクプラズマの電子密度を反映している。ターゲット印加電圧である 290V 付近に高エネルギー成分の信号が存在することがわかる。この高エネルギー成分はターゲット浸食領域の対向部である半径位置付近で大きなピーク値をもつことがわかる。ターゲットを純銅に変更するとこの高エネルギー成分は消失することから、この高エネルギー成分は主に金属添加酸化亜鉛ターゲットから放出された酸素イオンと考えられる。D 電圧が 0 ボルト付近の低エネルギー部 EDF のピーク値は、磁気フィルタの中心磁束密度の増加とともに約 3 桁低下し、180G 以上では飽和した。一方、高エネルギー部 EDF のピーク値は、400G までの磁界の増加に対してはほとんど変化せず、720G の磁束密度でも 70% までの低下に留まった。以上から、本実験配置の条件下では、マグネトロン放電に極力揺動を与えず負イオン測定を行うには 200 G 程度の中心磁束密度が望ましいと考えられる。

図4は、3インチ Ga 添加 ZnO の 1Pa DCMS 中で、半径位置 15 mm において磁化 RFEA で測定された負イオンに対応する高エネルギー部 EDF の直流電力依存性である。放電電力およびターゲット印加電圧の増加に伴い、EDF のピーク値が徐々に増加することとピーク値をとるエネルギー値が増加する様子が見られる。EDF ピークのエネルギー値はターゲット印加電圧よりわずかに高エネルギー側にシフトすることが注目される。

図5は、3インチ Ga 添加 ZnO の 1Pa 13.56 MHz RFMS 中で、半径位置 15 mm において磁化 RFEA で測定された負イオンに対応する高エネルギー部 EDF の RF 電力依存性である。高周波放電の自己バイアス電圧の位置を図中に矢印で示す。今回の実験では RF 除去 filter 無しで EDF 測定を行ったせいか、高周波ノイズが多く、SN 比が 10 未満しかなかった。それでも、RFMS 中での酸素負イオンの EDF は直流放電の場合と対照的に、直流自己バイアス電圧を中心として広いエネルギー範囲に分散する様子が確認できる。

以上要約すると、RFEA の入射開口部の前面に永久磁石による磁気フィルタ領域を設けた結果、負イオンの EDF をより明瞭に測定することに成功した。磁気フィルタを用いることで、電子の流入が抑えられ、0V 付近のバルクプラズマプラズマ電子に関する信号強度が約 2 桁減少し、ターゲット印加電圧付近で高エネルギー負イオンの信号ピークが明瞭に見えるようになった。高エネルギー酸素負イオンが、主にターゲット印加電圧に対応したエネルギーで、ターゲット浸食領域の対向側に流入することが確認された。得られた EDF 測定結果は、従来のエネルギー分解型質量分析計で得られた結果と遜色ない。エネルギー分解型質量分析計による負イオン測定は、差動排気を必要とし、大型で可搬性がないのに比べ、磁化 RFEA による負イオン測定は、質量分離はできないが、非常に安価でコンパクト、空間スキャンが容易である。ただし、磁気フィルタの透過特性には、荷電粒子のラーマ半径の違いだけでなく、磁気フィルタ内部でのプラズマ密度の減少も考慮する必要がある。Parallel 伝導度, Pedersen 伝導度, Hall 伝導度および電子の平行拡散損失に伴う正イオンの両極性拡散損失を含めた解析が必要であると考えられる。

高エネルギー酸素負イオンの基板入射は、金属添加酸化亜鉛膜の結晶性の低下を通じて粒界散乱の増大をもたらす、電子移動度の低下をもたらす可能性がある。また、過剰な酸素供給により酸素空孔の減少を引き起こし、結果としてキャリア密度を低下させる可能性もある。

本研究では、データ取得効率改善により、研究開始当初と比べてエネルギー分解能が約5倍向上し、データ取得時間は約1/5に短縮し、全体的な測定パフォーマンスは25倍向上した。その結果、金属添加 ZnO 用直流もしくは RF のマグネトロンスパッタ (DCMS, RFMS) において、より広範囲の放電条件で基板に入射する正・負の荷電粒子のエネルギー分布関数を詳細に調査可能となった。RFEA 内のメッシュグリッドを光学透過率の大きなものに置き換え、荷電粒子のグリッド透過率を向上させるとともに、グリッド電位分布の最適化を行った結果、4枚グリッドを使用してもコレクタ電流を十分に確保することが可能になった。接地したプラズマ対向グリッドを追加した方が、高周波ノイズの影響を受けにくく、マグネトロンスパッタリング (RFMS) における高エネルギー負イオンの EDF の構造がより精度よく確認することができるようになった。しかし、それと同時に、グリッド枚数の増加による入射粒子束の減少に伴う信号レベルの低下もあり、一概にメリットデメリットを判断するまでには至っていない。状況によって使い分けの必要がありそうである。プラズマ対向グリッドを負にバイアスするとイオン衝撃による二次電子放出が生じることを確認しており、これらは偽りのバルクプラズマ電子の信号もしくは偽りの低エネルギー負イオンの信号をもたらすので注意が必要である。

謝辞 本研究に参加された長崎大学工学部工学科・大学院工学研究科電気電子工学コースの学生諸子と叱咤激励・助言等をいただいた関係各位に深く感謝申し上げます。

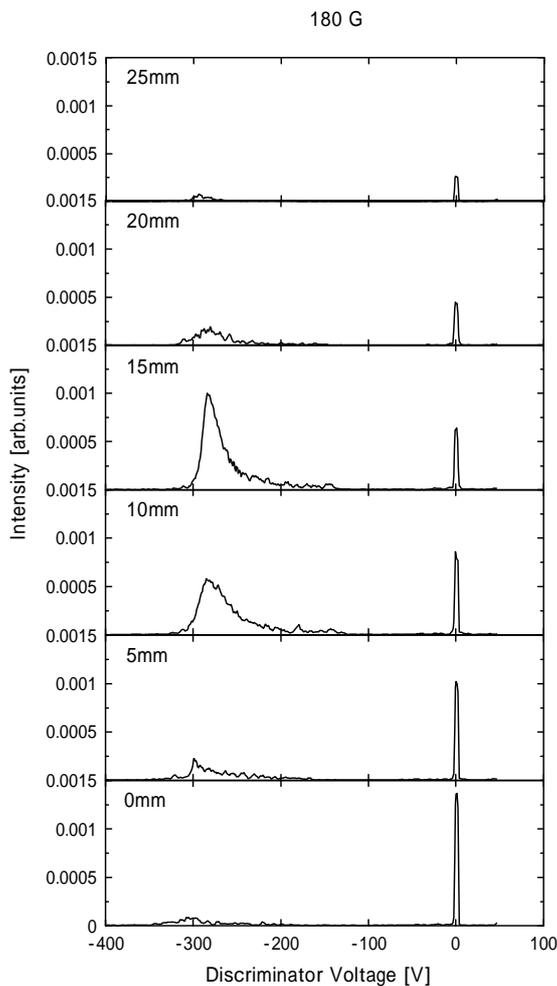


図3. 中心磁束密度 180G の磁化 RFEA による EDF 測定結果 (径方向分布)

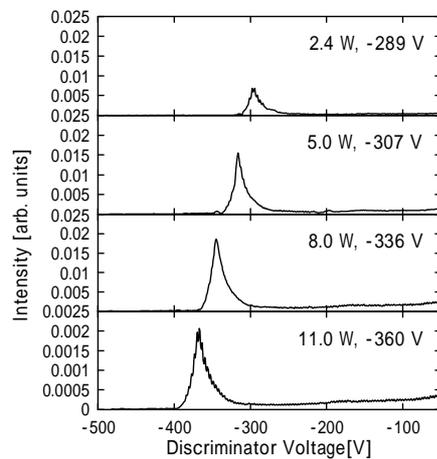


図4. 3 インチ Ga 添加 ZnO の 1 Pa DCMS における半径位置 15mm で測定された負イオンに対応する高エネルギー部 EDF の DC 電力依存性

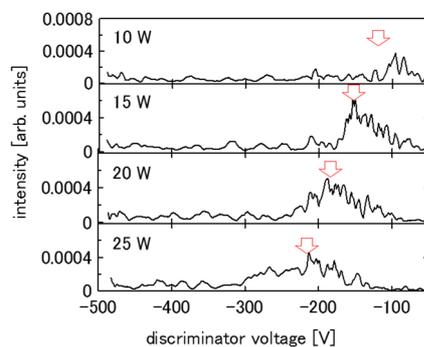


図5. 3 インチ Ga 添加 ZnO の 1 Pa, 13.56 Hz RFMS における半径位置 15mm で測定された負イオンに対応する高エネルギー部 EDF の RF 電力依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 Yoshinobu Matsuda, Koki Watanabe, Shoma Uzunoe, Tomohiro Furusato	4. 巻 -
2. 論文標題 Energy distribution function of substrate incident negative ions in magnetron sputtering of metal-doped ZnO target measured by magnetized retarding field energy analyzer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acddf0	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 埋ノ江翔真, 渡辺航希, 早川誠一, 金堀洋輔, 松田良信	4. 巻 1
2. 論文標題 ZnO ターゲットと Cu ターゲットにおける基板入射イオンエネルギー分布関数の比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第26回支部大会研究発表論文集	6. 最初と最後の頁 35-36
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 無
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 渡辺航希, 埋ノ江翔真, 金堀洋輔, 早川誠一, 松田良信	4. 巻 1
2. 論文標題 磁化反射電界型エネルギー分析器を用いたイオンエネルギー分布関数測定に及ぼす磁界強度の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第26回支部大会研究発表論文集	6. 最初と最後の頁 9-10
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 無
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 小久江利光, 井川樹, 埋ノ江翔真, 渡辺航希, 古里友宏, 松田良信	4. 巻 1
2. 論文標題 反射電界型エネルギー分析器による基板入射イオンエネルギー分布計測におけるSN比の改善	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第25回支部大会論文集	6. 最初と最後の頁 49-50
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 無
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 井川樹, 小久江利光, 渡辺航希, 埋ノ江翔真, 松田良信	4. 巻 1
2. 論文標題 イオンエネルギー分布関数測定用改良型RFEAの動作性能試験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第25回支部大会論文集	6. 最初と最後の頁 47-48
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 無
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 安元秀, 小久江利光, 井川樹, 松田良信, 山下敬彦	4. 巻 1
2. 論文標題 反射電界型エネルギー分析器を用いたエネルギー分布関数測定におけるデータ収集システムの改良	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 38th Symposium on Plasma Processing (SPP-38) /The 33rd Symposium on Plasma Science for Materials (SPSM33) January 27-29, 2021, online	6. 最初と最後の頁 140-141
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 無
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 安元秀, 小久江利光, 井川樹, 松田良信, 山下敬彦	4. 巻 1
2. 論文標題 磁気フィルタ付RFEAを用いたDCMS中のイオンエネルギー分布関数測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第23回支部大会研究発表論文集	6. 最初と最後の頁 37-38
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 無
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 Yoshinobu Matsuda, Naoki Matsuo, Kohei Sakamoto, Masanori Shinohara, Tomohiro Furusato, and Takahiko Yamashita	4. 巻 58
2. 論文標題 Reduction and uniformization of the resistivity of Ga-doped ZnO by combining short-gap magnetron sputtering and buffer layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SEED04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab09c7	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22件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 埋ノ江翔真, 渡辺航希, 早川誠一, 金堀洋輔, 松田良信
2. 発表標題 ZnO ターゲットと Cu ターゲットにおける基板入射イオンエネルギー分布関数の比較
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第26回支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺航希, 埋ノ江翔真, 金堀洋輔, 早川誠一, 松田良信
2. 発表標題 磁化反射電界型エネルギー分析器を用いたイオンエネルギー分布関数測定に及ぼす磁界強度の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第26回支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺航希, 埋ノ江翔真, 金堀洋輔, 早川誠一, 松田良信
2. 発表標題 磁化反射電界型エネルギー分析器を用いた負イオンエネルギー分布関数測定における磁界強度の影響
3. 学会等名 2022年（令和4年度）応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 埋ノ江翔真, 渡辺航希, 早川誠一, 金堀洋輔, 松田良信
2. 発表標題 スパッタリング基板入射イオンエネルギー分布関数に及ぼすターゲット材料の影響
3. 学会等名 2022年（令和4年度）応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinobu Matsuda, Shoma Uzunoe, Koki Watanabe
2. 発表標題 Energy distribution function of substrate incident negative ions in DC magnetron sputtering of metal-doped ZnO target measured by magnetized retarding field energy analyzer
3. 学会等名 Proc. of the 11th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-11) / 2022 Gaseous Electronics Conference (GEC 2022), October 3-7 2022, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuki Igawa, Toshimitsu Ogue, Kouki Watanabe, Shoma Uzunoe, Yoshinobu Matsuda
2. 発表標題 Production and operational performance test of the second retarding field energy analyzer to use for measuring ion distribution function
3. 学会等名 The 39th Symposium on Plasma Processing/ The 34th Symposium on Plasma Science for Materials (SPP39/SPSM34) January 24, 2022, virtual conference online
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小久江 利光、井川 樹、埋ノ江 翔真、渡辺 航希、古里 友宏、松田 良信
2. 発表標題 反射電界型エネルギー分析器を用いたDCマグネトロンスパッタリングにおけるエネルギー分布関数測定
3. 学会等名 2021年(令和3年度)応用物理学会九州支部学術講演会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井川樹, 小久江利光, 渡辺航希, 埋ノ江翔真, 松田良信
2. 発表標題 イオンエネルギー分布関数測定用改良型RFEAの動作性能試験
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第25回支部大会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小久江利光, 井川樹, 埋ノ江翔真, 渡辺航希, 古里友宏, 松田良信
2. 発表標題 反射電界型エネルギー分析器による基板入射イオンエネルギー分布計測におけるSN比の改善
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第25回支部大会 オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安元秀, 小久江利光, 井川樹, 松田良信, 山下敬彦
2. 発表標題 反射電界型エネルギー分析器を用いたエネルギー分布関数測定におけるデータ収集システムの改良
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 安元秀, 小久江利光, 井川樹, 松田良信, 山下敬彦
2. 発表標題 磁気フィルタ付RFEAを用いたDCMS中のイオンエネルギー分布関数測定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第23回支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshinobu Matsuda, Masaki Ishiba, Shu Yasumoto, Atsushi Kina, Tomohiro Furusato, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Measurement of energy distribution function of negative ions incident on substrate by using retarding field energy analyzer attached with magnetic filter
3. 学会等名 XXXIV ICPIG & ICRP-10 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Ishiba, Yoshinobu Matsuda, Shu Yasumoto, Atsushi Kina, Tomohiro Furusato, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Measurement of energy distribution function of negatively charged particles incident on a substrate using retarding field energy analyzer in DC magnetron sputtering
3. 学会等名 XXXIV ICPIG & ICRP-10 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinobu Matsuda, Masaki Ishiba, Shu Yasumoto, Tomohiro Furusato, and Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Measurement of ion energy distribution incident on a magnetron sputter deposition substrate by retarding field energy analyzer
3. 学会等名 The 12th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 良信, 石場 将希, 安元 秀, 古里 友宏, 山下 敬彦
2. 発表標題 磁気フィルタ付反射電界型エネルギー分析器による負イオン計測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 良信, 石場 将希, 安元 秀, 古里 友宏, 山下 敬彦
2. 発表標題 Measurement of energy distribution function of negative ions incident on substrate by using retarding field energy analyzer attached with magnetic filter
3. 学会等名 第35回九州・山口プラズマ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinobu Matsuda, Masaki Ishiba, Shu Yasumoto, Tomohiro Furusato, and Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Measurement of energy distribution function of charged particles incident on substrate in RF magnetron sputtering by retarding field energy analyzer
3. 学会等名 Int. Symp. on Dry Process (DPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安元秀, 石場将希, 松田良信, 喜納淳, 山下敬彦
2. 発表標題 酸化物ターゲットを用いたDC マグネトロンスパッタリングにおけるエネルギー分布関数測定の磁気フィルタ効果
3. 学会等名 2019年(令和1年度)応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石場将希, 安元秀, 松田良信, 喜納淳, 山下敬彦
2. 発表標題 反射電界型エネルギー分析器を用いたRF マグネトロンスパッタリングにおけるエネルギー分布関数測定
3. 学会等名 2019年(令和1年度)応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinobu Matsuda, Masaki Ishiba, Shu Yasumoto, Tomohiro Furusato, and Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Measurement of Energy Distribution Functions of Positive and Negative Species by using Retarding Field Energy Analyzer
3. 学会等名 APSPT-11 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Ishiba, Shu Yasumoto, Yoshinobu Matsuda, Atsushi Kina, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Energy distribution measurement of substrate incident charged particles in DC magnetron discharge of oxide target
3. 学会等名 MRM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安元 秀、石場 将希、喜納 淳、松田良信、山下 敬彦
2. 発表標題 酸化物ターゲットを用いたRFマグネトロンスパッタリングにおけるエネルギー分布関数の磁気フィルタ効果
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第23回支部大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Nagasaki Univ. Plasma Engineering Laboratory http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/plasma/index.html http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/plasma/index.html 長崎大学・プラズマ工学研究室のホームページ http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/plasma/index.html
--

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

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