

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12633

研究課題名(和文) 偏極イオンの表面散乱における基礎の構築と、スピンと構造の複合分析への展開

研究課題名(英文) Analysis of spin and atomic arrangement of surfaces by electron spin-polarized ion scattering

研究代表者

鈴木 拓 (SUZUKI, Taku)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：60354354

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)：低速He<sup>+</sup>イオン散乱分光法は、最表面の構造解析に有用である。その構造解析で重要な役割を果たすのがシャドーコーンであり、その形状を精緻に決定することは、精密な構造解析に不可欠である。本研究者は近年、自身が開発したスピン偏極イオン散乱分光法(SP-ISS)を用いて、低速He<sup>+</sup>イオン散乱が遮蔽されたクーロン力に基づく中心力だけでは無く、スピン軌道相互作用(SOC)に基づく非中心力によっても影響を受けることを明らかにしてきた。本研究では、このSOCとシャドーコーンの形状との関係を明らかにした。そしてこの知見に基づき、SP-ISSを用いたスピンと構造の複合分析へと研究を展開させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面の原子レベルでの構造解析は、基礎研究のみならず、薄膜や表面を利用する様々なデバイス開発でも重要である。低速イオン散乱分光法は、そのような表面構造解析のための手法の一つとして確立している。本研究では、その構造解析で用いるシャドーコーンとスピンの関係について初めて解明した。そしてこの解明に用いたスピン偏極イオン散乱分光法を、Ge/Fe界面や、欠陥由来のZnO表面強磁性等の、スピンと構造の表面複合分析に適用した。

研究成果の概要(英文)：Low-energy He<sup>+</sup> ion scattering spectroscopy is useful for structural analysis of the topmost surface. The shadow cones play an essential role in structural analysis, and their precise determination is indispensable for accurate structural analysis. Recently, using the spin-polarized ion scattering spectroscopy (SP-ISS) developed by the present researcher, it has been clarified that the low-energy He<sup>+</sup> ion scattering is affected not only by the central force based on the shielded Coulomb force but also by the non-central force based on the spin-orbit coupling (SOC). In this study, we clarified the relationship between this SOC and the shape of the shadow cone. We expanded the study to a combined spin and structure analysis using SP-ISS based on this knowledge.

研究分野：イオンビーム表面分析

キーワード：スピン イオン散乱分光 最表面

### 1. 研究開始当初の背景

イオンビームは、材料の分析や加工等に幅広く用いられている。これらは、ミクロスケールに見れば多くの場合で、入射イオンと材料中の原子との衝突現象を利用する点で共通である。この衝突現象を規定するのが、イオン - 原子間の相互作用ポテンシャルである。すなわち、相互作用ポテンシャルを精密に決定することは、様々な応用分野に波及効果のある重要な研究課題である。

本研究者は近年、低速イオン-原子間相互作用には遮蔽されたクーロンポテンシャルの様な、いわゆる中心力以外に非中心力からの寄与があること、またこの非中心力はスピン軌道相互作用(SOC)によってもたらされることを示してきた。これは本研究者自身がこれまでに独自に開発した電子スピンを偏極したヘリウムイオンビーム(以降、偏極イオンビーム)を用いた散乱分光実験(SP-ISS)に基づく指摘である。SP-ISSは、偏極イオンビームを試料表面に入射し、散乱ヘリウムイオン強度を入射イオンのスピンの向き別に計測する手法である。これによりスピン依存性散乱(スピン非対称性)が評価される。

本研究者らによって提案されたイオン - 原子間衝突におけるSOCは、イオンが固体標的の原子と衝突する際に、イオンの電子スピン $S$ と、標的原子核の運動(これはイオンから見れば、自身の周りを過渡的に周回する回転運動と見なせる)に由来する磁場 $H$ (ビオ・サバル場)との結合 $S \cdot H$ に起源を持つ非中心力である(図1)。SP-ISS実験から評価された非中心力に由来するポテンシャルの大きさ $U_{SOC}$ は、中心力ポテンシャル $U_C$ の10%程度にも及び、決して無視出来ない。これに基づき本研究者らは、全ポテンシャル $U$ は、 $U = U_C + U_{SOC}$ の関係にあることを示してきた。

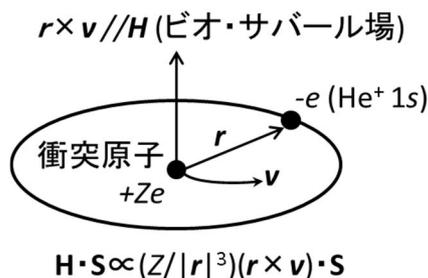


図1 He<sup>+</sup>イオン - 原子衝突におけるSOCの定性的なモデル

### 2. 研究の目的

本研究者らは上記のようにSOCによるスピン依存性散乱モデルを提唱し、これにより実験で観測される非中心力ポテンシャルを説明できることを示した。このモデルでは、シャドーコーン形状(後述)がスピンに依存する可能性がある。この検証は、低速イオン散乱分光法(LEIS)による表面構造解析の観点から重要である。なぜなら、シャドーコーンはLEISによる表面構造解析の基本原則と関係しており、その形状をスピン別に精密に決定することは表面原子位置の決定精度を向上する観点からも極めて重要なためである。そこで本研究では、シャドーコーン形状のスピン依存性を検証して、そのスピン依存性の有無について明らかにすることを目的の一つとした(研究成果の(1))。

ところでHe<sup>+</sup>イオンと表面原子との衝突におけるSOCに関するこれまでの説明では、衝突過程においてHe<sup>+</sup>イオンと標的原子との間で仮想的な中間状態が形成されるとされてきた。そしてこの中間状態においてHe<sup>+</sup>イオンと表面の間で遷移する電子が、He<sup>+</sup>イオンの入射速度から予想されるSOCによる効果(He<sup>+</sup>イオン散乱のスピン非対称性)よりも数桁も大きなスピン非対称率をもたらすことが説明されてきた。この中間状態は標的の電子状態に依存すると考えられるため、SOCには標的の固体の効果が含まれる可能性がある。SOCはイオン散乱の強度に影響するために、その解明は構造解析において重要である。そこでSOCにおける固体の効果(標的が固体であることに由来する効果)を解明することも本研究の目的とした(研究成果の(2))。

これらの目的を達成し、イオン散乱を用いた表面構造解析におけるSOCの効果を知明した後、SP-ISSによる表面の構造とスピンの複合分析を、そのような複合分析が求められている強磁性体金属/半導体界面等の解析に応用する(研究成果の(3))。

### 3. 研究の方法

イオンビームを固体表面に入射すると、イオンと表面原子との相互作用の結果、表面原子の背後にシャドーコーンが生ずる。シャドーコーンの形状はイオン - 原子相互作用ポテンシャルで一義に決まる。したがって、あらかじめシャドーコーンの形状が分かれば、シャドーイング効果が現れる入射角度(臨界角)を調べることで表面の原子位置を決定することができる。逆に、表面の原子位置があらかじめ分かれば、シャドーイング効果を利用することで、シャドーコーンの形状を

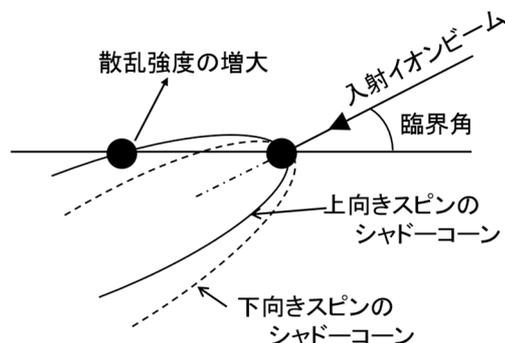


図2 シャドーコーン形状のスピン依存性の評価方法

正確に評価することができる。すなわち、入射イオンビームと試料表面の法線を含む平面（散乱面、図2の紙面）での2原子間距離が既知の試料（例えば、単結晶）を用意し、その試料表面での臨界角を測定することで、シャドーコーンの形状を決定することができる（図2）。このようにして、入射イオンビームのスピンの（上向き、または下向き）に対してそれぞれのシャドーコーンの形状を決定することで、理論から予測されるSOCの大きさを定量的に検証することができる。

SOCと、標的が固体であることに由来する効果との関係は、標的の電子状態を原子から固体に変化させて、それとSP-ISSのスピンの非対称性との関係を調べればよい。そのような標的の一つとしてAuのナノ粒子が挙げられる。Auナノ粒子では、そのサイズに応じて電子状態が変化し、それが例えば、光電子スペクトルにおけるスピン軌道分裂として観測されることが知られている。Auナノ粒子は、Auと相互作用の小さな固体基板の上に、真空蒸着等の手法で成長させることができる。そのようにして成長させたAuナノ粒子の大きさを、例えばイオビーム照射によって変化させながら、Auからの散乱におけるSOCによるスピンの非対称性を追跡することで、SOCにおける固体の効果を検証する。

SP-ISSの実験は、全て超高真空中で行った。入射He<sup>+</sup>イオンのスピン偏極率は、約20%であった。He<sup>+</sup>イオンのスピンの向き（上向き、又は下向き）の制御は、スピン偏極に用いる円偏光のヘリシティから制御した。He<sup>+</sup>イオンのスピン偏極は、1083 nmのD<sub>0</sub>線の光ポンピングを併用して行った。散乱He<sup>+</sup>イオンのエネルギー分析には、角度分解型の静電半球型セクターアナライザ、その制御には自作のコントローラをそれぞれ使い、パスエネルギーは318 eVに設定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) シャドーコーン形状のスピンの依存性について

Au(111)単結晶基板を試料として用いた。この表面を、超高真空中で2 keV アルゴンイオンスパッタリング（20分）と773 Kでのアニーリング（10分）を繰り返すことで清浄化した。表面の清浄性は、イオン散乱のスペクトルと反射高速電子回折によって確認した。

図3は、Auピーク強度と入射角度（入射He<sup>+</sup>イオンビームと表面法線との間の角度）との関係を、入射He<sup>+</sup>イオンのスピンの向き別に調べた結果である。散乱面は{111}である。図3では、Auのピーク強度はスピン間で有意に異なっているが、これはSOCのためである。また強度に関しては、入射角度が大きくなるにつれて、すなわち、すれすれ入射に近づくにつれて強度が減少しているが、特に65度から70度の間で急激に減少している。これはシャドーイング効果のためである。つまりHe<sup>+</sup>イオンと衝突する最表面のAu原子の背後に出来るシャドーコーンによって、隣接する表面のAu原子が隠されるために、このような急激な強度の現象が起きる。80度以上の入射角度では、このシャドーイング効果のために、Auからの散乱は殆ど起きない。

本研究の目的の一つは、シャドーコーン形状のスピンの依存性を明らかにすることであり、そのためにはこのシャドーイング効果を起こす角度（臨界角）のスピンの依存性を調べればよい。

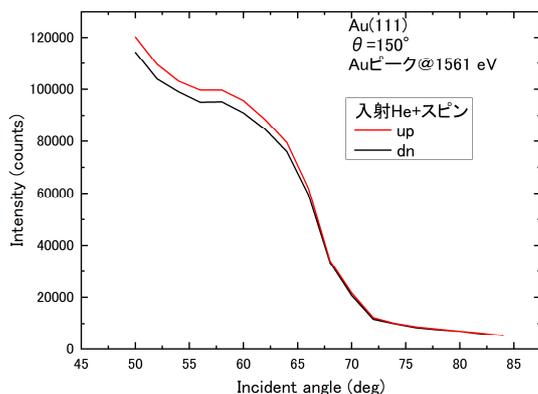


図3 Au(111)でのAuからの散乱強度と入射角度との関係

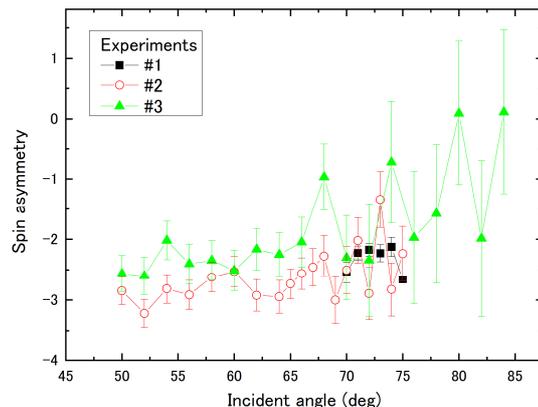


図4 Au(111)でのAuピーク位置でのスピンの非対称率と入射角度との関係

図4は、Auピーク位置（1561 eV）でのスピンの非対称率と入射角度との関係を示している。スピンの非対称率は、 $(I_{up} - I_{dn}) / (I_{up} + I_{dn})$ と定義される。ただし $I_{up}$ と $I_{dn}$ はそれぞれ、上向きと下向きにスピン偏極したHe<sup>+</sup>イオンの散乱強度である。この実験では再現性を確認するために、同様の測定を、試料を再作製して3回繰り返した（図4の#1~#3）。スピンの非対称率は入射角度と共に減少している様子が観測されている。ただしその減少の程度はとても小さい。特に80度以上の入射角度では金からの散乱強度がとても小さくなり、その結果、統計誤差（エラーバーで示されている）が大きくなる。したがって、そのような大きな入射角度においてはスピンの非対称率の測定精度が低下する。

入射角度の増大に伴うスピンの非対称性の減少は、散乱におけるHe<sup>+</sup>イオンの軌道が入射角度に

依存して変化することに起因する。すなわち、スピン非対称性散乱が  $\text{He}^+$  と Au の二体衝突のみによって決まっているとすると、 $\text{He}^+$  イオンの軌道は散乱角度で決まる。しかし実際の Au 標的には、標的となる Au 原子の周囲に周期的に Au 原子が配置しており、 $\text{He}^+$  イオンの軌道はその影響を受ける。そして入射角度が臨界角よりも十分に大きくなると、 $\text{He}^+$  イオンの金原子からの散乱確率はゼロに近づき（シャドーイング効果）それに伴いスピン非対称性も消失する。

$\text{He}^+$  イオン散乱に関して、標的となる Au 原子の周囲にある Au 原子からの影響の一つは、再イオン化である。すなわち、 $\text{He}^+$  イオンは一つ目の Au 原子との衝突で中性化され、基底状態の He 原子となる。そして次の表面 Au 原子との衝突の際に、再びイオン化され、その  $\text{He}^+$  イオンが測定されるという過程である。 $\text{He}^+$  イオンの Au との衝突における再イオン化の確率はとても小さく、通常の構造解析では無視して議論されているが、本研究の様な散乱強度における極小の変化を論じる場合には、それが問題になり得る。事実、再イオン化はスピンに依存しない過程であり、実質的には入射イオンの脱偏極過程として作用する。したがって再イオン化が起こるとスピン非対称性は減少する方向に変化し、これは図 4 で観測されている入射角度の増大に伴うスピン非対称性の減少を説明する。

標的となる Au 原子の周りに位置する Au 原子も多重散乱で散乱に寄与する場合、このように非対称性が減少する。Au は、 $\text{He}^+$  イオン散乱における再イオン化の確率が全元素中でも最も小さな元素の一つとして知られており、この多重散乱によるスピン非対称性の減少の効果は、他の元素を標的にした場合には、より大きくなると考えられる。これは広義では固体の効果であり、磁性に由来する表面元素のスピン非対称率を SP-ISS で調べる場合には、このような多重散乱の効果に注意する必要があることが明らかとなった。

本研究で問題にしているシャドーコーンの形状の形状がスピンに依存するかどうかは、シャドーイング効果の臨界角付近でのスピン非対称率の変化から判断される。すなわち、この臨界角がスピンに依存するかどうかを見ればよい。図 4 では、上記で論じた固体の効果によるスピン非対称率の変化が統計誤差程度に大きく、臨界角のスピン依存性については判然としない。逆に言えば、SP-ISS の測定の精度では、シャドーコーン形状のスピン依存性は、構造解析に影響を与えるほどの大きさは持たないことが明らかになった。

## (2) SOC における固体の効果の解明

図 5 は、HOPG の基板に Au 1 を室温で蒸着して、その表面に約 2 keV の  $\text{He}^+$  イオンを長時間照射した際のスペクトル変化を示している。散乱角は 150 度、入射角は 0 度である。HOPG の表面清浄化は、2 keV  $\text{Ar}^+$  イオンビームスパッタリング（20 分間）によって行った。イオンビームの照射によるスパッタリングのために、スパッタリングレートの低い  $\text{He}^+$  イオンビームであっても 5 時間 40 分の照射後には、1540 eV 付近の Au のピーク強度が約 1/4 にまで減少している様子が観測されている。この結果は、Au からの散乱における中性化確率がこの膜厚の範囲内で一定であると仮定すれば、Au の表面被覆率が 1/4 程度に減少したことを示している。先行研究では HOPG へのごく微量の Au の室温蒸着によって、Au のナノ粒子が形成することが示されている。したがって図 5 の結果は、この Au ナノ粒子の大きさが、 $\text{He}^+$  イオンビームの長時間スパッタリングによって顕著に減少することを示している。また別の先行研究では、そのように Au ナノ粒子が小さくなることに起因して、光電子スペクトルでの SOC に基づいて分裂したピークの間隔が変化することが示されている。すなわち、Au ナノ粒子の電子状態はその大きさに依存して変化する。したがって HOPG 上の Au ナノ粒子への  $\text{He}^+$  イオンビーム照射と共に Au のスピン非対称率を追跡すれば、イオン散乱の SOC と標的の電子状態との関係を解明することができる。

図 6 は、 $\text{He}^+$  イオンビームの照射時間と Au ピーク位置でのスピン非対称率との関係を示している。この測定前に、図 5 の照射前のスペクトルを測定し、またこの図 6 の測定のために、図 5 の照射後のスペクトルを測定した。図 6 では、一定の時間間隔で測定したスピン非対称率が、統計誤差（エラーバー）の範囲内に収まっていることを示している。つまり SP-ISS の測定精度において

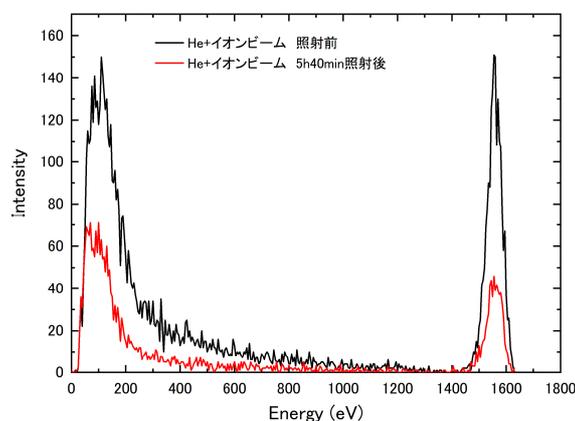


図 5 Au 1 /HOPG への 2 keV  $\text{He}^+$  イオンビーム照射（5 時間 40 分）前後のイオン散乱スペクトル

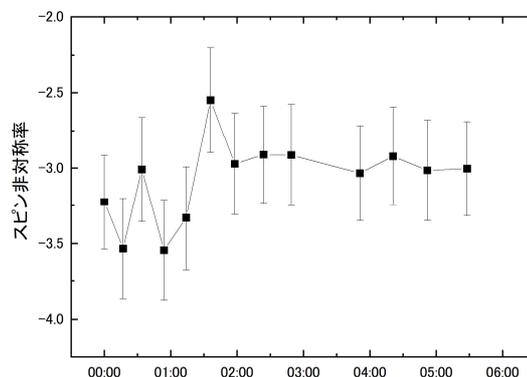


図 6  $\text{He}^+$  イオンビーム照射時間とスピン非対称率との関係

は、SOCは2体衝突のみを考えればよく、標的の電子状態に由来する固体の効果は無視できることが確認された。すなわち、SOCの効果が大きな金を標的元素に用いても、標的の電子状態による効果はSP-ISSの測定精度よりも小さいので、SOCの大きな元素系であっても固体の効果は除外して構造解析をすればよい。

He<sup>+</sup>イオン散乱におけるSOCでは、入射He<sup>+</sup>イオンの速度から予想されるスピン非対称率に比べて、実際には数桁大きなスピン非対称性散乱が観測される。この大きなSOCの効果は、散乱において過渡的、仮想的に形成されるHe<sup>+</sup>-標的原子の中間状態に由来するとされてきた。本研究では、この中間状態は、標的の原子的な電子構造から決まっていることが示唆された。

### (3) スピンと構造の複合分析への展開

本研究の前半ではHe<sup>+</sup>イオン散乱におけるSOCについて検討した。そして、イオン散乱による構造解析で重要な役割を果たすシャドーコーンの形状とスピンとの関係を明らかにした。またSOCにおける標的の電子状態による効果についても明らかにした。この検討の後に、本研究では、SP-ISSをスピンと最表面の複合分析に適用した。具体的には、Fe/Ge界面のスピン分極と原子配列の解析、アルカン分子の吸着構造の解析、欠陥由来の金属酸化物の磁性、パルスジェット法との融合による準大気圧下での表面構造解析、へと研究を展開した。ここでは紙面が限られることから、これらの中で、欠陥に由来する金属酸化物(ZnO)表面の磁性についてSP-ISSによって検討した結果を述べる。

ZnO等の非磁性金属酸化物において、点欠陥由来の強磁性について興味を持たれてきた。様々な磁性分析手法を用いてその解析がなされてきたが、それが本当に欠陥由来の強磁性なのか、又は不純物由来の磁性なのか、未だに議論が続いている。その様に議論が混沌としている背景として、不純物を完全に排除することが難しいこと、またその不純物と欠陥由来の磁性を区別することが難しいことが挙げられる。SP-ISSでは元素を選別した上で、最表面のスピンを選択的に検出することが出来るので、これらの困難を克服できる可能性があり、欠陥由来の表面磁性について検証を行った。

試料はZn終端したZnO(0001)極性面である。この清浄化は、超高真空中で2 keV Ar<sup>+</sup>スパッタリングとアニーリングを繰り返すことで行った。この一連の清浄化処理と、その際に測定されたイオン散乱スペクトルが図7に示されている。清浄化処理の後、イオン散乱のスペクトルではZnとOのピークのみが観測されており、清浄な表面が得られたことが分かる。

この様にして得られたZn-ZnO(0001)表面に2 keV Ar<sup>+</sup>イオンビームを照射した際の、Znピーク位置で測定したスピン非対称率が図8に示されている。このようなイオンビーム照射によって、表面付近に様々な欠陥が導入されることはよく知られている。スピン非対称率は、試料を100 Gauss程度でパルス磁化して、残留磁化の下で測定した。また、表面に垂直方向のスピン分極が検出できる磁場配置とした。測定は清浄表面(測定No.1)から始め、Ar<sup>+</sup>スパッタリング、超高真空中でのアニーリング処理を行うたびに測定した(No.2~No.4)。またNo.5~8は、この測定の再現性を検証するために行った測定である。スピン非対称率の変化は、ほぼエラーバー(統計誤差)の範囲内に収まっており、表面に導入された欠陥によって強磁性が発現していることは確認されなかった。データの一部は、エラーバーを超えて変化しているようにも見えるが、その後に行った同様の測定では再現されず、この変化は入射イオンビームのスピン偏極率の変動に由来すると考えられる。このことから、少なくともSP-ISSの測定精度の範囲内では、ZnO表面の欠陥や表面の特異性に由来する強磁性は確認されなかった。

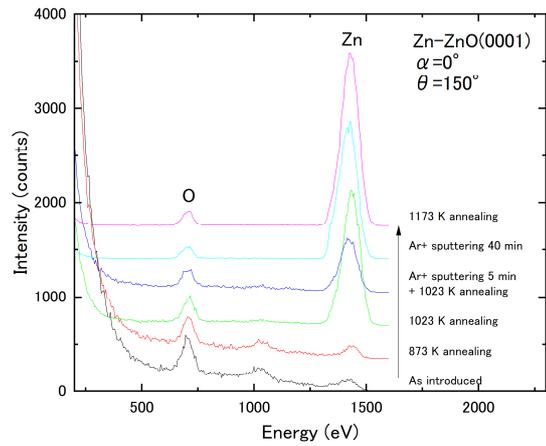


図7 Zn-ZnO(0001)のイオン散乱スペクトル

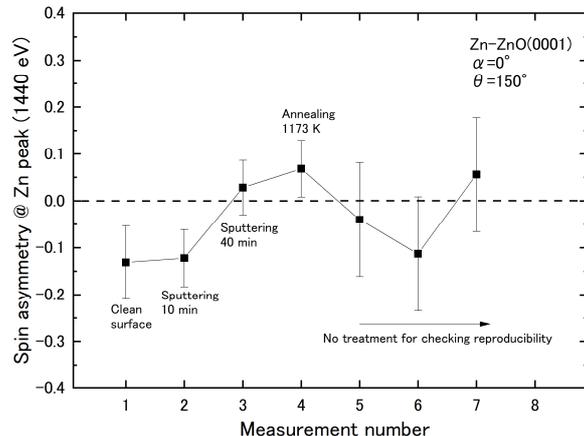


図8 Zn-ZnO(0001)への2 keV Ar<sup>+</sup>イオンビーム照射と、Znピーク位置で測定したスピン非対称率との関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 Suzuki T.T., Adachi Y., Ohgaki T., Sakaguchi I.	4. 巻 538
2. 論文標題 He+ LEIS analysis combined with pulsed jet technique of ethanol sensing by a ZnO surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 148102 ~ 148102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.148102	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 SAKAGUCHI Isao, SAITO Noriko, SUZUKI Taku T., OHNISHI Tsuyoshi	4. 巻 129
2. 論文標題 Study of oxygen diffusion in dense lanthanum oxide ceramics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 79 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.20127	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 Suzuki T.T., Adachi Y., Ohgaki T., Sakaguchi I., Nakamura M., Ohashi H., Aimi A., Fujimoto K.	4. 巻 179
2. 論文標題 Electrical resistance response of a ZnO single-crystalline substrate to trace ethanol under pulsed air jet irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 109526 ~ 109526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2020.109526	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 Suzuki Taku T., Ohgaki Takeshi, Adachi Yutaka, Sakaguchi Isao, Nakamura Minoru, Ohashi Hideyuki, Aimi Akihisa, Fujimoto Kenjiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Ethanol Gas Sensing by a Zn-Terminated ZnO(0001) Bulk Single-Crystalline Substrate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 21104 ~ 21112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c02750	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 Suzuki Taku T.	4. 巻 683
2. 論文標題 Atomic arrangement and spin polarization at a Ge/Fe(100) surface studied by spin-polarized ion scattering spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2019.01.005	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 Pal Chittatosh, Suzuki Taku T., Majumder Subrata	4. 巻 784
2. 論文標題 Electrochemical growth of two-dimensional MoS2 nanosheets for development of femtomolar Hg(II) ion label-free biosensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139115 ~ 139115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2021.139115	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 Suzuki T.T., Adachi Y., Ohgaki T., Sakaguchi I.	4. 巻 53
2. 論文標題 Crystal plane dependent ethanol gas sensing of ZnO studied by low energy He+ ion scattering combined with pulsed jet technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 747 ~ 753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6974	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 Kim Jae-Hun, Sakaguchi Isao, Hishita Shunich, Suzuki Taku T., Saito Noriko	4. 巻 10
2. 論文標題 Au-Decorated 1D SnO2 Nanowire/2D WS2 Nanosheet Composite for CO Gas Sensing at Room Temperature in Self-Heating Mode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemosensors	6. 最初と最後の頁 132 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/chemosensors10040132	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 Suzuki T. T., Ohgaki T., Adachi Y., Sakaguchi I.	4. 巻 131
2. 論文標題 Polarity reversal of resistance response to trace H <sub>2</sub> gas in the air between asymmetrically shaped electrodes on rutile-TiO <sub>2</sub> single crystal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 034501 ~ 034501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0078296	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27件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲.
2. 発表標題 He <sup>+</sup> LEIS analysis combined with pulsed jet technique of ethanol sensing by a ZnO surface
3. 学会等名 第21回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲.
2. 発表標題 パルスジェット法と組合わせた低速He <sup>+</sup> イオン散乱分光によるZnO表面のエタノールセンシングに関する分析
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂口 勲, 齋藤 紀子, 鈴木 拓, 大西 剛.
2. 発表標題 高密度La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の酸素拡散に対する添加物効果
3. 学会等名 第40回電子材料研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋英幸, 中村穂, 鈴木 拓.
2. 発表標題 イオンビーム照射による酸化物半導体ガスセンサの表面改質
3. 学会等名 ナノテクノロジープラットフォーム利用成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲.
2. 発表標題 低速He+イオン散乱分光とパルスジェット法の組み合わせによる駆動中ガスセンサの最表面構造解析に関する検討
3. 学会等名 第68回春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲.
2. 発表標題 エタノールガスをセンシング中の垂鉛終端ZnO(0001)最表面の 構造解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 穂, ADACHI, Yutaka, SAITO, Noriko, SAKAGUCHI, Isao, 藤本 憲次郎, 相見晃久, SUZUKI, Taku
2. 発表標題 Surface modification of ZnO by ion implantation of Bi, Eu, and Sn followed by annealing for enhancing gas sensing properties.
3. 学会等名 23rd international workshop on inelastic ion-surface collisions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ADACHI, Yutaka, SAITO, Noriko, SAKAGUCHI, Isao, SUZUKI, Taku
2. 発表標題 Gas sensing properties of MgxZn1-xO thin films.
3. 学会等名 The 13rd Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 坂口 勲.
2. 発表標題 ガスセンサ表面の準大気圧下での表面分析のためのパルスジェット法の開発.
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SUZUKI, Taku, ADACHI, Yutaka, SAKAGUCHI, Isao
2. 発表標題 Dynamic high pressure technique for surface analysis of gas sensors in quasi-operating condition.
3. 学会等名 AVS-66 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂口 勲, 齋藤 紀子, 鈴木 拓.
2. 発表標題 緻密な酸化インジウム焼結体の合成と酸素欠陥化学.
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会・総会.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 坂口 勲.
2. 発表標題 半導体ガスセンサのパルスジェットによる動作環境中表面分析に関する検討.
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 穂, ADACHI, Yutaka, SAITO, Noriko, SAKAGUCHI, Isao, 藤本 憲次郎, 相見晃久, SUZUKI, Taku.
2. 発表標題 Crystal plane-dependent ethanol sensing properties of single crystalline ZnO and their modification by Bi, Eu, and Sn ion implantation.
3. 学会等名 STAC-11 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ADACHI, Yutaka, SAKAGUCHI, Isao, SAITO, Noriko, SUZUKI, Taku.
2. 発表標題 Effects of doping on gas sensing properties of ZnO films.
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SAKAGUCHI, Isao, 渡邊 賢, SAITO, Noriko, SUZUKI, Taku, ADACHI, Yutaka, OHASHI, Naoki.
2. 発表標題 Oxygen diffusion in BaTiO <sub>3</sub> ceramics doped with Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
3. 学会等名 STAC-11
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 OHASHI, Hideyuki, 相見 晃久, SAKAGUCHI, Isao, SUZUKI, Taku, 藤本 憲次郎.
2. 発表標題 Hydrogen gas detection by WO <sub>3</sub> -based nanosheet thin films.
3. 学会等名 STAC-11 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SUZUKI, Taku, ADACHI, Yutaka, SAKAGUCHI, Isao.
2. 発表標題 Dynamic high pressure technique for surface analysis of gas sensors in quasi-operating condition.
3. 学会等名 STAC11 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Crystal plane dependent ethanol gas sensing of ZnO studied by low-energy He <sup>+</sup> ion scattering combined with pulsed jet technique
3. 学会等名 第22回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Crystal plane dependent ethanol gas sensing of ZnO studied by low-energy He <sup>+</sup> ion scattering combined with pulsed jet technique
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Electrical Resistance Response of a ZnO Single-Crystalline Substrate to Trace Ethanol Under Pulsed Air Jet Irradiation
3. 学会等名 AVS 67th international symposium & exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 He+ LEIS analysis combined with pulsed jet technique of gas sensing mechanism on semiconductor gas sensor surfaces
3. 学会等名 IBA&PIXE-SIMS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 酸化亜鉛の結晶面方位とエタノールセンシングとの関係 ~パルスジェット+低速He+イオン散乱分光による最表面分析
3. 学会等名 応用物理学会 第82回秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木拓
2. 発表標題 イオンビームによる表面・界面の解析と改質
3. 学会等名 応用物理学会 第82回秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達 裕, 鈴木 拓
2. 発表標題 Mg添加によるZnO薄膜の雰囲気ガス応答特性向上のメカニズム
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂口 勲, 齋藤 紀子, 鈴木 拓
2. 発表標題 スパッタ法で合成したドナー添加酸化スズ薄膜のガスセンサ特性
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第34回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 ルチルTiO <sub>2</sub> 単結晶上の非対称形状の電極間における水素に対する抵抗応答と、バイアス極性に応じたその極性反転
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 安達 裕, 鈴木 拓
2. 発表標題 酸化タングステン薄膜のエピタキシャル製膜とガス応答特性
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ガスセンサ	発明者 鈴木拓、大垣武、安達裕、坂口勲	権利者 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-086679	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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