

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22130

研究課題名（和文）MOS構造表面の吸着分子に対する触媒会合化学反応のゲート電圧による電子制御

研究課題名（英文）Electric control of catalytic association chemical reaction for adsorbed molecules on MOS-structured surfaces by applying gate voltages

研究代表者

服部 賢（Hattori, Ken）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：00222216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンピューター等に入っているシリコン半導体デバイスの基本機能を、化学分子反応に展開することに挑戦しました。本研究のアイデアは、半導体中を流れる電子（または正孔）のエネルギーを利用して、表面に吸着した気体分子の会合反応や脱離反応を起こさせようというものです。本研究では、金属/酸化物/半導体の積層構造を作製し、積層構造の両端への電圧印加で、エネルギーをもつ電子を金属層に注入することにより、金属層表面に吸着会合したガス分子の電子励起脱離反応の誘導に成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、コンピューターに使われるトランジスタ素子を、全く異なる視点で触媒化学反応デバイスに応用できることを示し、言わば、電気電子工学分野と分子化学合成分野を融合した体系の芽を出させた点にあります。また、社会的意義は、今までの熱反応を利用した分子合成ではできない複雑で貴重な分子を、電子励起という非熱平衡アプローチで製造し得ることを示した点で、分子の化学反応を制御する夢の触媒シリコンデバイスを目指す初端と位置付けられます。

研究成果の概要（英文）：In this research, we challenged to develop the basic functions of silicon semiconductor devices included in computers, etc. into chemical molecular reactions. The research idea is to use the energy of electrons (or holes) flowing through a semiconductor to induce association reaction and desorption reaction of gas molecules adsorbed on the surface. In the research, we have successfully demonstrated electronic excitation-induced desorption reactions of gas molecules associatively adsorbed on the metal layer surface, by producing a metal/oxide/semiconductor stacking structure, and by injecting energetically high electrons into the metal layer driven by applying voltages to both sides of the stacked structure.

研究分野：物性物理学

キーワード：電子制御 会合脱離反応 MOS構造 吸着分子 ゲート電圧

### 1. 研究開始当初の背景

表面に電子線や光を照射すると吸着分子が脱離する。吸着分子/基板表面が電子励起され、励起エネルギーが分子・表面間のボンド切断に使用され、脱離するという電子遷移誘起脱離(DIET)機構が、表面基礎科学では古くより議論されている。DIET をデバイス応用する動向はなかったが、電子励起は分子を構成する原子の移動(会合反応等)を誘起し得るので、脱離のみならず化学反応を任意に電子制御する夢の触媒デバイスに原理的には応用できる筈である。

従来の方式では、固体外部に表面の励起源が必要となるため、触媒デバイスは複雑になり実用からは程遠い。そこで最近、固体内部に電子励起源がある金属/酸化物/半導体(MOS)積層構造を利用した励起キャリア(電子または正孔)注入(図1)という構成が考案された[1]。金属層(M)と半導体層(S)にゲート電圧( $V_G$ )を印加すると、キャリア( $V_G > 0V$  の場合は電子、 $V_G < 0V$  の場合は正孔)が  $V_G$  近くのエネルギーを持って半導体層から金属層へトンネルまたは弾道的に突入するので、このキャリアのエネルギーを、金属層表面上に吸着した分子の会合脱離反応(活性化エネルギー  $E_A$  を必要とする)に利用しよう(図1)というものである。この際、励起キャリアが大幅なエネルギー損失がなく金属層の裏面から表面に弾道できるように、金属層の厚さをキャリアの非弾性平均自由行程(数 10 nm)以下にするのが設計のポイントとなる。

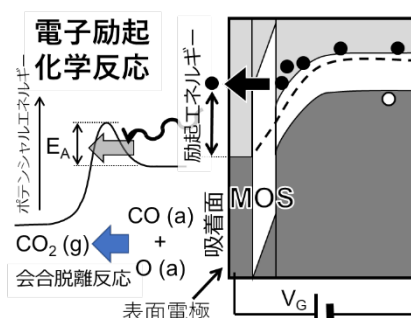


図1. MOS構造での励起キャリアによる触媒化学反応のアイデア。

### 2. 研究の目的

今までに、励起キャリア注入の電子励起による吸着分子の脱離反応そのものは、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4/Fe-MOS$ 系[1]で研究代表者らにより確認されてきた。しかしながら、吸着分子同士が互いに結合する会合反応の実現の可能性は不明である。一つのボンドを切断すれば良い脱離過程と、多段階の過程を必要とする会合反応では困難さの次元が全く異なるが、エネルギー的には反応のチャンスはある。

加えて、電子励起エネルギーの(会合及び)脱離反応への転換には、エネルギー移動のダイナミクスが関与しており、そのエネルギー遷移の機構も未知である。本研究は外部電圧で積極的に化学反応を制御する設計思想である。一方、設計原理は異なるが類似して、外部から光エネルギーを吸収し受動的に化学反応を進行させる光触媒がある。この光触媒のエネルギー遷移の機構(吸着分子への励起キャリアの直接遷移、表面プラズモンの間接的媒介などが議論されている)と類似の機構が予想できるが、機構の解明は未着手である。

そこで本研究では、キャリア注入型電子励起による会合脱離反応の実現、またエネルギー遷移機構の解明に向けた準備を目的とした。本研究は、学術的に電気電子工学における半導体デバイス分野と分子化学合成における触媒化学分野の異分野融合に相当し、大気中や液中でも動作し、MOS金属表面に接した分子の化学反応を制御する夢の触媒シリコンデバイスに向けた挑戦的研究と位置付けられる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 会合反応

##### ① 反応系

本研究は原理検証であるため、会合反応は標準的な反応系の一つである一酸化炭素の酸化反応:  $CO + (1/2)O_2 \rightarrow CO_2$  を対象反応として選択し、また測定温度(室温)では会合反応があまり進行せず( $E_A \sim 1.3 eV$ )、かつ安定した試料作製が可能なPd金属層表面を会合反応の環境とした。

##### ② 実験

吸着会合脱離反応時の不純物の影響を避けるため、本計測実験は全て超高真空中の現有の脱離計測装置にて行った。初めにPd-MOS試料を超高真空槽で準備し、 $CO$ ガス、 $O_2$ ガスを導入後、ゲート電圧( $V_G$ )を印加し、脱離する分子を四重極質量分析計(QMS、二次電子増倍管付き)で計測し、脱離 $CO_2$ 分子信号強度の様相を調べた。

図2に示すようにPd-MOS試料を、熱酸化膜(膜厚 5 nm)付きのp型Si基板(比抵抗  $< 0.02 \Omega cm$ ,  $10 \times 10 \times 0.5 mm^3$ )に、Au(150 nm)/Al(150 nm)電極( $2 \times 2 mm^2$ )を2か所(S1, S2、間隔 2 mm)蒸着、Si基板裏面の電極(B)とともに配線を施し、超高真空槽(基本真空度  $< 10^{-8} Pa$ )に導入後、Pdを約 5 nm 蒸着することにより作製した。このPd金属層がゲート電極(S1-S2間)は電気

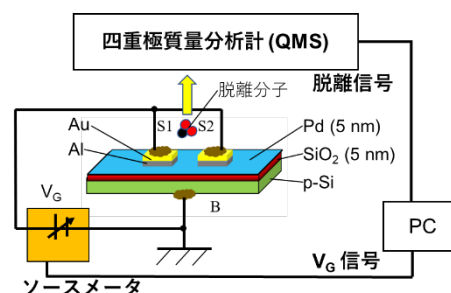


図2. Pd-MOS試料と脱離計測装置の概略。

接続)となる。Si 裏面の電極 B に対してこのゲート電極に、PC 制御のソースメータを用いてプログラムした条件で  $V_G$  を印加した。

対象反応の最終生成物は  $CO_2$  である。真空中に残留する二酸化炭素分子( $^{12}C^{16}O_2$ : 質量電荷比  $m/z = 44$ )の吸着種と、会合反応での生成種を区別するために、実験では通常の  $^{12}C^{16}O$  ガス( $m/z = 28$ )と同位体  $^{18}O_2$  ガス( $m/z = 36$ )を導入ガスとして使用した。この場合、生成種として、 $^{12}C^{16}O + (1/2) ^{18}O_2 \rightarrow ^{12}C^{16}O^{18}O$  ( $m/z = 46$ )が予想できる。そこで残留吸着種と生成種の明瞭な区別が可能な質量分解能( $M/\Delta M > 100$ )をもつ QMS を用いた。また、S1-S2 間の前方約 1 mm に  $\phi 2$  mm のスキマー孔(その後方に差動排気型の QMS)を設置し、S1-S2 間からの生成種を主に検出した。計測実験では、QMS で測定する  $m/z = 46$  の脱離( $^{12}C^{16}O^{18}O$ )分子信号強度が、短時間印加の  $V_G$  (大きさ、極性を変化)に対する時間応答を系統的に調べた。

## (2) エネルギー遷移機構：発光計測装置の準備

エネルギー遷移の有力な候補は、光触媒などでも議論されている表面プラズモンなどである。会合反応は非発光性の過程であり、エネルギー移動の理解にはその相補的な過程である発光測定が大きなヒントになると予想される。脱離反応は数 V 印加の  $V_G$  から発生するので、対応する紫外～近赤外光の発光スペクトルとなる。そこで、本研究では脱離計測装置に組み込み可能で、同期計測を可能とする発光計測装置を作製した。特に、真空窓越しから 15 cm ほど離れた S1-S2 間(~2 mm)という限られた領域の発光を、MOS 試料の斜め横から観測するという脱離計測装置の制約があるため、発光位置視認が容易な空間画像取得タイプを第一優先とし、エネルギー分解の制約はあまりない発光スペクトル分解機能を第二優先とした。

## 4. 研究成果

### (1) 吸着会合脱離反応

始めに主な実験結果①~④を記し、反応の様相⑤について議論する。

#### ① 酸化膜中の欠陥形成

後述する会合脱離反応を促す為に、Si 半導体層から Pd 金属層に向かって励起キャリアが移動する際、経路途中の  $SiO_2$  酸化膜層に、ある程度の導電性を持たせる必要があることが分かった。つまり、酸化膜内に積極的に欠陥準位を生成し、欠陥準位を介在として励起キャリアの移動性を確保する必要がある。この欠陥生成方法を探ったところ、 $V_G = \pm 4V$  印加で実現可能であることが判明した。実際に、図 3 は複数の作製試料における  $\pm 4V$  印加の(a)前、(b)後の(Pd-Si 間の)リーク電流の  $V_G$  依存性を示しており、 $\pm 4V$  印加後は、リーク電流が  $10^{-6}$ ~ $10^{-4}$  A から  $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$  A ( $V_G = +2V$ )と 1 桁以上増加することが分かる。会合脱離反応実験に用いた試料は全て、上記の  $SiO_2$  酸化膜活性化工程を施したものをを使用した。

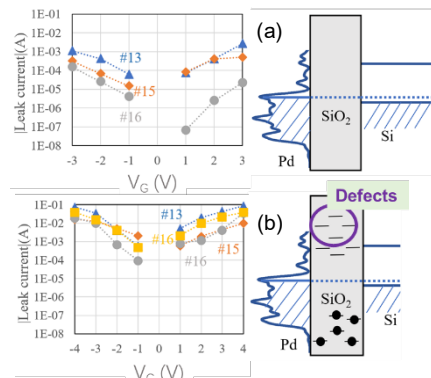


図 3.  $V_G = \pm 4V$  印加(a)前(b)後のリーク電流の  $V_G$  依存性。 $SiO_2$  中に欠陥を積極的に生成する。

#### ② ガス導入

酸化膜活性化した超高真空中の Pd-MOS 試料に室温で、 $^{18}O_2$  ガス、 $^{12}C^{16}O$  ガスをこの順に各々 1,000 L (ラングミュア、 $1.7 \times 10^{-4}$  Pa で 800 s 間)暴露した。図 4 は QMS で測定した対象とする質量電荷比の典型的な分圧(検出イオン電流強度: 対数表示)を示している。酸素導入時(図 4(a))は同位体  $^{18}O_2$  ( $m/z=36$ )が、一酸化炭素導入時(図 4(b))は  $^{12}C^{16}O$  ( $m/z = 28$ )が主成分であることが分かる。また、微量ながら、このガス導入時に会合反応生成物  $^{12}C^{16}O^{18}O$  ( $m/z = 46$ )が生じることが分かった。

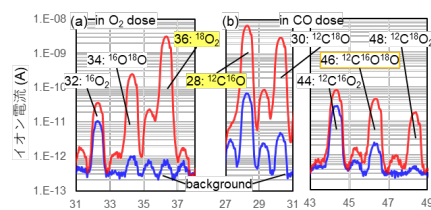


図 4. (a)  $^{18}O_2$  ガス、(b)  $^{12}C^{16}O$  ガス導入時の分圧変化。赤色曲線はガス導入時、青色曲線はバックグラウンド。縦軸は対数。

#### ③ ゲート電圧印加による反応誘起

$^{18}O_2$  ガス、 $^{12}C^{16}O$  ガスを室温で暴露した Pd-MOS 試料にゲート電圧を印加した際の  $m/z = 46$ :  $^{12}C^{16}O^{18}O$  の分圧変化、即ち、脱離強度と、リーク電流の時間変化の典型的な結果を図 5 に示す。この実験では、保持時間 200 s、インターバル時間 2,000 s で  $V_G = -1, -2, -3, -4, +1, +2, +3 V$  を印加した。図 5 から、図 3(b)で示した範囲のリーク電流が  $V_G$  印加時に流れていることが確かに分かる。 $^{12}C^{16}O^{18}O$  の脱離は、 $V_G = -1, -2, -3, -4, +1 V$  印加では観測されないが、 $V_G = +2, +3 V$  では、印加後に遅れて、脱離が突発的に始まったことが分かる。

特徴的なのは、(i) 同様なリーク電流が流れているにもかかわらず、負極性の  $V_G$  では脱離が発生せず、正極性の  $V_G > +2 V$  で脱離が発生している点、(ii) 保持時間 200 s の  $V_G$  印加中ではなく、印加終了後 200-300 s 経過して脱離が発生する点である。この特徴は作製した 2 試料(各



2回計測)の計4回の計測すべてにおいて確認された。

#### ④ 脱離種

図5で示される正極性  $V_G$  印加による遅延脱離は、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  (46)のみならず、導入ガスである  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  (28) や不純物ガスである  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$  (18) など幾つかの分子において、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  (46) と同期した類似の(但し強度は異なる)脱離信号が観測された。

#### ⑤ 吸着会合脱離反応の機構の議論

上記①～④の主な結果から下記の点を議論する。

【非熱的脱離反応】 脱離反応は、 $V_G$  非印加時に生じていることから、単純な  $V_G \times$  リーク電流によるジュール熱が脱離の要因ではないことは明らかである。 $V_G$  極性依存性もこれを指示する。従って、何らかのキャリア注入型電子励起機構がこの現象を誘導していると言える。

【遅延脱離】  $V_G$  印加後の脱離遅延(200-300 s)は、半導体層から金属層へ向かう励起キャリアーが、途中の酸化膜層にて、励起状態を維持したまま(拡散の途中で  $V_G = 0$  となっても)移動することを意味している。数値シミュレーション[2]によると、励起キャリアーがホッピングする酸化膜層中の欠陥状態(状態密度分布、膜厚等)に依存して拡散することが示唆されており、本実験結果(図5)はこの数値シミュレーションを定性的に支持している。シミュレーションではパラメータで遅延時間が  $10^{-14}$  s 以下から  $10^{10}$  s 以上まで幅広く変わるため、200-300 s は想定内である。定量的には、 $V_G$  負荷印加で欠陥状態を変化(図3)させたときの欠陥密度分布と、脱離(あるいは発光等の)遅延時間との相関を系統的に調べることにより、励起キャリアーのホッピングの詳細が明瞭になるであろう。

【ホット電子注入】 脱離が負極性  $V_G$  では生じず正極性  $V_G$  のみで生じる結果は、脱離に寄与する励起状態の(ホットな)キャリアーは、正孔ではなく電子であることを示している。このキャリアー選択性の原因の候補は、MOSを構成するSi半導体層、 $\text{SiO}_2$ 酸化膜層、Pd金属層の電子状態にあると考えられる。Si半導体については、p/n型や多数少数キャリアーに関わらず、 $V_G$  印加バンド湾曲により、電子・正孔が酸化膜界面にほぼ同じ密度で蓄積する[1]ことから原因ではなく、 $\text{SiO}_2$ 酸化膜中の占有状態・非占有状態の欠陥準位分布も大きな偏りがない[2]ことからこれも原因ではないとして良い。加えて、他の金属層を用いた試料系[1]では異なる  $V_G$  極性依存性を示すことから、Pd金属層の電子状態がホット電子注入に起因すると言える。

図6の電子状態概略図にあるように、Pdの非占有状態の金属バンドは、エネルギー範囲が狭くフェルミ準位近傍にある。そのため、 $\text{SiO}_2$ 酸化膜層の非占有欠陥準位を拡散するホットな電子がPdフェルミ準位に直接遷移し、効率良くエネルギーを放出するものと予想できる。一方、Pdの占有金属バンドは広いいためホットな正孔はPd占有バンドに共鳴的に遷移し、そして金属層内で急速にエネルギーを失活するため会合脱離反応にホットな正孔のエネルギーを利用することは難しいと予想できる。

ホット電子のPdフェルミ準位への遷移によるエネルギー放出が脱離反応の介在となるという考えは、脱離種に依存しないという実験結果からも支持される。実験では、 $\text{CO}_2$ に限らず、COや $\text{H}_2\text{O}$ の脱離が観測された。このことは、吸着分子に依存する特定の吸着エネルギー準位のみならず励起キャリアーが捕獲され脱離を誘起するという描像ではなく、例えば、表面プラズモンなどの脱離反応を媒介とする何らかのエネルギー形態があることを示している。

【会合反応】 現時点では、キャリアー注入型電子励起による会合反応は明確には確認できていない。ゲート電圧印加キャリアー注入時の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  (46)脱離のピーク強度(例えば、図5:  $8 \times 10^{-9}$  A)が、ガス導入時の生成 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 分圧強度(例えば、図4(b):  $4 \times 10^{-11}$  A)より大きいとは言うものの、定量的な議論のためには、ガス導入時の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 生成蓄積吸着量との比較が必要であり、今のところ蓄積吸着量は不明である。将来、この点を解明するには、電子エネルギー損失分光法などの吸着種に対する質量数敏感な解析法との併用が有用である。また、ガス導入時の生成反応を抑制させるために、室温ではなく低温でのガス導入などの工夫も必要となる。

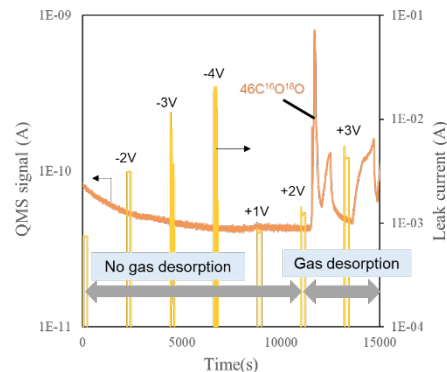


図5.  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  の脱離強度(橙色、左対数軸)、リーク電流(絶対値、黄色、右対数軸)の時間変化。-1, -2, -3, -4, +1 V で  $V_G$  を 200 s 印加(インターバル 2,000 s)。

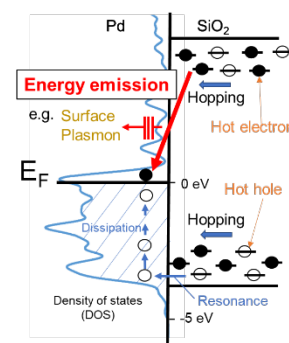


図6. Pd と  $\text{SiO}_2$  の電子バンド、電子状態密度を基にしたホット電子注入の概略図。

## (2) 発光計測装置

上述の4(1)⑤で議論したように、(会合)脱離反応では、表面プラズモンなど何らかのエネルギー形態が媒介している。これは非発光性のエネルギー伝達であるが、その相補的過程として、発光過程への分枝が予想され、発光過程の評価はエネルギー遷移機構を解く大きな手がかりとなる。そこで、本研究では脱離計測装置に組み込み可能な発光計測装置を作製した。

上述の3(2)で記したように、第一優先は発光位置視認のための空間画像取得機能で、第二優先は発光スペクトル測定である。そこで、CMOSカメラでの画像取得を基本型とし、発光スペクトルはバンドパスフィルターで分解する発光計測装置(図7)を作製した。カメラとレンズの選定により、ピクセルあたり50  $\mu\text{m}$ 程度の空間分解があるため、S1-S2間の限られた領域が容易に視認できる。また6つの光学フィルターを電動フィルターホイールに取り付けることで、6波長領域の自動計測が可能である。カメラとフィルターホイールはPC制御となっており、脱離計測と同期した発光計測が可能となっている。将来、エネルギー遷移機構の解明に向け、開発した発光計測装置も用いた、脱離と発光の同期計測が重要となる。

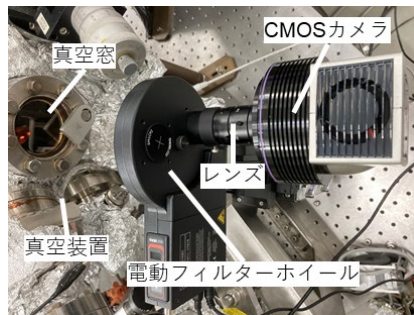


図7. 作製した発光計測装置 (CMOSカメラ、レンズ、電動フィルターホイールから成る)。

## (3) まとめ

本研究では、キャリア注入型電子励起による会合脱離反応の実現、またエネルギー遷移機構の解明に向けた準備を目的とした。会合反応については明確に言えないものの、脱離反応は明確に電子励起によって実現できており、更に、ゲート電圧印加後しばらく経ってからの遅延脱離であり、ゲート電圧の極性に依存するという当初予想していなかった知見が得られた。これらの新知見より、ホットな電子の金属層への注入、脱励起によるエネルギー放出が脱離反応を誘導するエネルギー遷移機構の概要を議論した。また、詳細なエネルギー遷移機構の解明に向けた準備として、相補的な過程をターゲットにする発光計測装置を作製した。

今後、電子励起による会合反応の実現と確認のために、低温でのガス導入など導入時の会合反応を抑制する工夫、ガス導入後の表面吸着種の直接計測との組み合わせが望まれる。また、会合脱離機構の理解のために、脱離と発光の同期計測が重要となる。これらの研究により、キャリア注入型電子励起による会合脱離反応の基本過程と応用に向けた道筋の理解が進むであろう。

本研究のように、触媒化学分野と半導体デバイス分野を融合させた、即ち、化学反応を任意に電子制御する夢の触媒デバイスの作製を目指す試みは、国内外ともに成されておらず、本研究はその萌芽研究と位置付けられる。将来的には、今までの熱反応を利用した分子合成ではできない複雑で貴重な分子を、電子励起という非熱平衡アプローチで製造するなど、分子、高分子、バイオにおけるモノづくりの先端科学技術としての発展が期待できる。

### <引用文献>

- [1] N. Hirota, K. Hattori, H. Daimon, A.N. Hattori, and H. Tanaka, "Molecule desorption induced by gate-voltage application in MOS structure", Appl. Phys. Express 9 (2016) 047002.
- [2] W. Göss, "Hole Trapping and the Negative Bias Temperature Instability", Dissertation (Vienna University of Technology, 2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Pamasi Liliyany Noviyanty, Nishida Shota, Takemoto Shohei, Hattori Ken	4. 巻 90
2. 論文標題 Growth of Fe Islands on Clean and Ammonia-saturated Si(111)7 × 7 Surfaces Studied by in situ Electron Diffraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034601 ~ 034601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.034601	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Haobang Yang, Mio Nishida, Higashi Takaaki, Aydar Irmikimov, and Ken Hattori
2. 発表標題 Challenge of molecular reaction induced by hot carriers on MOS structure
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 Haobang Yang, Mio Nishida, Aydar Irmikimov, and Ken Hattori
2. 発表標題 Trail for CO Oxidation reaction induced by hot carriers on Pd-MOS structure
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haobang Yang, Mio Nishida, Aydar Irmikimov, and Ken Hattori
2. 発表標題 Challenge of CO oxidation induced by hot carrier on Pd/Si/SiO <sub>2</sub> MOS structure
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 L.N. Pamasi, S. Takemoto, H. Yang, S. Nishida, K. Hattori, H. Daimon
2. 発表標題 Growth of Fe islands on Si(111)7x7 surfaces modified with ammonia
3. 学会等名 International Vacuum Conference (IVC)-21 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liliany Noviyanty Pamasi, Haoyu Yang, Shota Nishida, Shohei Takemoto, Ken Hattori, and Hiroshi Daimon
2. 発表標題 Difference in growth mode of Fe islands on clean and ammonia-saturated Si(111)7x7 surfaces
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (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	桃野 浩樹  (Momono Hiroki)  (40882527)	米子工業高等専門学校・その他部局等・助教   (55101)	

	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	楊 浩邦  (Yang Haobang)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程前期課程学生   (14603)	
研究 協力者	パマシ リリアニ  (Pamasi Liliany)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生   (14603)	

6. 研究組織（つづき）

	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	イリミキモフ アイダール  (Irmikimov Aydar)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・博士課程後期課程学生  (14603)	

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