

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02561

研究課題名(和文)原子層半導体のエッジエンジニアリング

研究課題名(英文)Edge engineering of atomic-layer semiconductors

研究代表者

野内 亮(Nouchi, Ryo)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70452406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：エレクトロニクス素子の微細化に資すると期待される原子層物質であるが、微細化は原子層の狭細化を伴うことになると考えられる。その場合、細くなればなるほど増大する端(エッジ)の悪影響を低減するため、エッジの異種元素・分子による終端化が重要となる。本研究では、エッジ終端化効果の調査に適した試料として、分厚い原子層結晶を用いて代表的なエレクトロニクス素子である電界効果トランジスタを製作した。まず、その基本的特性を明らかにすることで、エッジ終端化効果の調査時の注意点を詳らかにした。次に、その結果を踏まえて、フッ素プラズマ処理によるエッジ終端化を行い、エッジ選択的終端化効果に関する情報を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層物質は1～数原子の厚みしかないため、表面に吸着した外来原子・分子の影響を強く受ける。従って、エッジ終端化を目指して導入する異種元素や分子がエッジのみに吸着するならば良いが、表面にも付着してしまうと、エッジ終端化効果のみを観測することはできない。これが、原子層物質のエッジ終端化研究の根本的な難しさである。このような状況に対し、本研究では、エッジ終端化効果を表面吸着効果と切り分けて評価する方法論として、分厚い結晶を用いたバックゲート型電界効果トランジスタを用いる手法を試みた。この素子構造では電流の流れる部分が結晶厚さの分だけ表面から離れることを利用し、エッジ終端化効果のみの調査に成功した。

研究成果の概要(英文)：Atomic layer materials are expected to contribute to the miniaturization of electronic devices, but the miniaturization is expected to be accompanied by narrowing of the atomic layers. In such cases, it is important to terminate the edges with different elements/molecules in order to reduce the deleterious effects of the edges, since the edge effects become larger as the atomic layers become narrower. In this study, field-effect transistors, which are typical electronic devices, were fabricated using thick atomic layer crystals as suitable samples for investigating the edge termination effect. First, by analyzing the basic characteristics of the transistors based on the thick crystal, we clarified the points to be considered when investigating the edge termination effect. Next, based on the results, we conducted edge termination by fluorine plasma treatment and succeeded in obtaining information on the edge termination effect on the transistor characteristics.

研究分野：電子デバイスを用いた表面界面科学

キーワード：原子層半導体 リングバンド 遷移金属ダイカルコゲナイド エッジ状態 二硫化モリブデン グラフェン エッジ終端化 ダングギャップ内準位

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

現在のシリコンエレクトロニクスにおける微細化の限界は、電極間距離(チャンネル長)が短くなることで生じる短チャンネル効果が決めている。この微細化限界を突破するには、短チャンネル素子でも電流が流れないオフ状態を実現することが必要であり、最も単純には、半導体層が非常に薄ければ解決できる。層状物質の剥離で得られる原子層物質は、薄い半導体の極限的存在、即ち、二次元構造を有する半導体として大きく注目されている。

シリコン等の三次元構造を有する半導体では、原子配列の周期構造の途切れに起因するダングリングボンド(未結合手)が表面に出現し、表面に局在する電子準位を形成する。この表面準位は、半導体内での電子トラップによる電子移動度低下や、電極界面での電荷注入障壁の制御性喪失(=Fermi準位ピニング)といった、半導体デバイス動作への悪影響を引き起こすため、表面準位低減のためのダングリングボンド終端化(例えばシリコン表面のフッ酸処理による水素化など)が精力的に試みられてきた。一方、原子層物質の母物質である層状物質は van der Waals 力により弱く積層した構造で、層間に化学結合が無く、表面ダングリングボンドは少ない。しかし、原子層物質であっても「端(エッジ)」には多くのダングリングボンドが存在する。ポストシリコン時代の超高集積化では、短チャンネル化に加え狭チャンネル化(半導体層の幅を狭くすること)も必須になると予想される。狭チャンネル素子ではエッジの影響が相対的に大きくなるため、原子層半導体の応用を考えるならば、エッジ状態低減のためのエッジ終端化が必要不可欠であると考えられるが、この点に関してこれまであまり注意が払われてきていなかった。

このような状況に対し、研究代表者は、原子層物質のエッジにおけるダングリングボンドが電子デバイスの特性に与える悪影響にいち早く着目し、電極界面の特性に関して理論・実験の両面から考察を行った[引用文献]。その結果、エッジのダングリングボンドによって半導体内にバンドの曲がりが生じるため、エッジ構造自体は1~数原子の幅でしかないとしても、デバイス特性に対しては $\mu\text{m}$ スケールで影響が及ぶことを明らかにした。即ち、デバイス特性に対しエッジ状態が存外に大きな影響を及ぼすことを意味しており、このことから、エッジ状態低減を目指す本研究の着想に至った。

### 2. 研究の目的

原子層物質は1~数原子の厚みしかないため、表面に吸着した外来原子・分子の影響を強く受ける。従って、エッジ終端化を目指して導入する異種元素や分子がエッジのみに吸着するならば良いが、表面にも付着してしまうと、エッジ終端化効果のみを観測することはできない。これが、原子層物質のエッジ終端化に関する研究の根本的な難しさである。このような状況に対し、本研究では、エッジのみの終端化効果を表面への付着効果と切り分けて評価する方法論として、分厚い結晶を用いたバックゲート型電界効果トランジスタ(FET)を用いる手法を試みた(図1)。分厚い結晶の場合、バックゲート型FETで電流が流れる部分(チャンネル)が表面から離れ、表面吸着効果は無視し得るというアイデアである。なお、代表的な原子層半導体である $\text{MoS}_2$ に関して、結晶厚さはエッジ状態にほぼ影響しないことが第一原理計算で示されており[引用文献]。エッジ状態の影響の調査に分厚い結晶を用いることの根本的な問題はない。また、この場合、表面には付着せずエッジのみを終端化できる技術が確立されていなくとも、エッジ状態がデバイス特性に与える影響についての調査が可能になるという利点もある。すなわち、本研究の目的は、分厚い層状半導体結晶をチャンネルに用いたバックゲート型FETにより、エッジ状態やエッジ終端化が電気的特性に及ぼす影響を、表面吸着効果と切り分けた形で調査すること、と書ける。

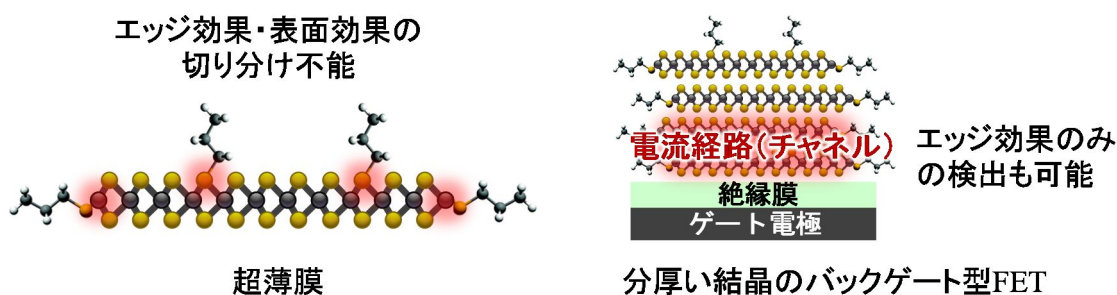


図1 原子層物質のエッジ終端化研究の根本的な難しさ(左)に対する本研究の試み(右)

### 3. 研究の方法

(1) 代表的な原子層半導体である $\text{MoS}_2$ に関して見てみると、これまでの報告例は単層極限を志向した研究が多い。それに対して本研究ではあえて分厚い結晶を用いるため、既報のFETとは特性が異なる可能性がある。そこで、まず、分厚い $\text{MoS}_2$ 薄片を用いたバックゲート型FETを作製し、その基本的特性について明らかにした。素子作製基板は300 nm厚の熱酸化膜を有する高ド

ープ Si を用いており、ここでは、Si 層が FET におけるゲート電極、熱酸化膜がゲート絶縁膜の役割を担う。この基板に、粘着テープを用いた天然結晶からの機械的剥離により、数十 nm 以上の厚さを有する MoS<sub>2</sub> 薄片を形成した。最後に、リソグラフィプロセスを用いて、剥離した結晶上に Cr/Au のソース・ドレイン電極を作製した。このように作製した素子の例を図 2(a) に示す。作製した素子の FET 特性は、まず大気中・室温で測定し、200 室素雰囲気下で 2 時間加熱した後、室温まで冷却してから室素雰囲気下で再度測定した。最後に、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて形状を詳細に観測した。

(2) 前項で調査した基本的特性を踏まえて、終端化処理が FET 特性に及ぼす影響を電気的特性や分光的手法により調査した。終端化処理手法としては、様々な気体の原子状曝露が可能なプラズマ処理を採用した。ナノ物質の FET 特性は水の影響を受けやすいことが知られていることから [引用文献] 疎水化が可能で FET 特性変化が大きいと期待されるフッ素のプラズマを用いた。フッ素プラズマ処理の方法としては、六フッ化硫黄や四フッ化メタンなどのガスのプラズマ化が一般的であるが、これらのガスは温暖化係数が高く忌避される傾向にあるため、テフロンシートを配置した真空容器内で Ar プラズマを発生させることで、間接的に高エネルギーフッ素種を生成する手法を採用した。

(3) ダングリングボンドを多く持つエッジが表面より化学的に活性であることは、広く受け入れられる事実である。従って、エッジ終端化反応の化学反応性を、エッジは終端化されるが表面はされない、という範囲内にうまく収められれば、エッジ選択的な反応の誘起が可能になると期待される。研究代表者は、原子層物質の化学反応性が FET 構造を用いる新奇手法で制御できることを見出し、半導体ではないものの、代表的な原子層物質であるグラフェンに関して、エッジ選択的な酸化反応の誘起に成功している [引用文献] 本研究では、研究分担者の有する位置選択的な X 線光電子分光 (XPS) 技術を用い、このエッジ選択的な酸化反応に関する化学状態について調査した。

#### 4. 研究成果

(1) 代表的な原子層半導体である MoS<sub>2</sub> の分厚い多層薄片を用いて多くの FET を作製したところ、多層 MoS<sub>2</sub> 薄片 FET の伝達特性 (ドレイン電流のゲート電圧依存性) は、図 2(b) に示すような二種類に分けられることが分かった。図 2(b) 上図においては、過去の報告でも多く見られる電流値の飽和が起こっており、これは、トランジスタ動作が Schottky 障壁変調によってなされることで理解される [引用文献] 一方で、本研究では、図 2(b) 下図のように、飽和が二段になっている特殊な階段状の伝達特性が頻繁に観測されることを見出した。これは閾値電圧 (伝達特性でドレイン電流が立ち上がるゲート電圧値) の異なる箇所がチャンネル内に 2 つ存在することを示唆している。伝達特性の形状の違いが何に起因するのかを確認するため、素子の詳細な AFM 像を取得した。図 2(c) 上図は図 2(b) 上図の、図 2(c) 下図は図 2(b) 下図の素子における MoS<sub>2</sub> 薄片端部の AFM 像である。これを見ると、二段構造が見られた素子である図 2(c) 下図では、エッジに薄い部分の存在が確認できる。

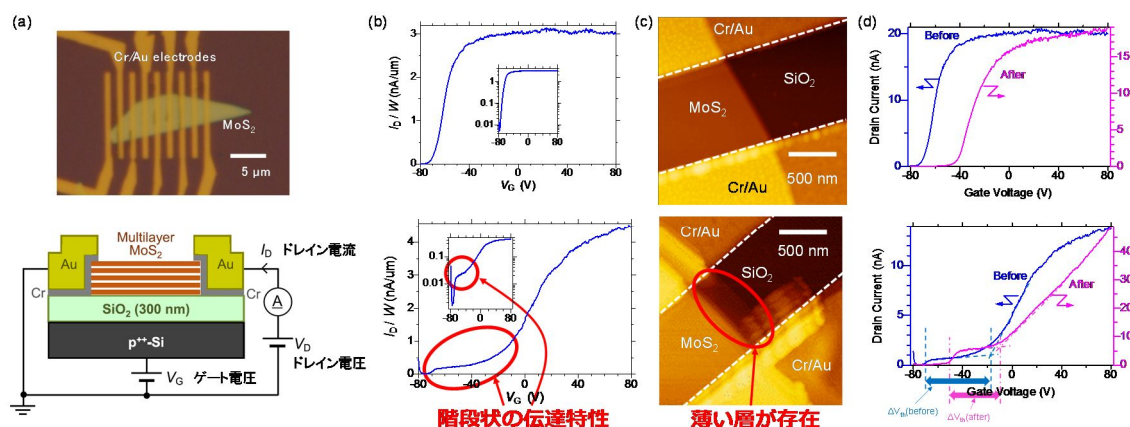


図 2 多層 MoS<sub>2</sub> 薄片を用いた FET において観測された階段状の伝達特性。(a) 作製した素子の光学顕微鏡像の例(上)と FET 構造の模式図(下)。通常の一段構造の伝達特性を示した素子(上)および本研究で見出した二段構造の伝達特性を示した素子(下)の(b) 伝達特性、(c) AFM 像、(d) 室素中加熱処理前後の伝達特性の比較。

このような膜厚の不均一性と閾値電圧のシフトを結びつけるメカニズムとして、表面吸着物の影響が挙げられる。表面吸着物からの電荷移動があれば、その分、閾値電圧はシフトする。電荷移動の効果は表面からの距離が離れるほど小さくなるため、膜厚の違いによって閾値電圧シ

フト量は異なるはずである。その結果、膜厚が異なる 2 つの箇所に関値差が生じると考えられる。そこで、表面吸着物の影響について調査するため、窒素下加熱処理による吸着物の除去を試みた。加熱後に大気暴露せずに再度測定したものと、加熱前の結果 (図 2(b) と同一) の比較を図 2(d) に示す。どちらの場合も、加熱後は閾値が正側にシフトしている。これはチャンネルに電子ドープしていた表面吸着物の脱離で理解できる。特異な二段の階段状構造が見られる図 2(d) 下図の場合、一段目と二段目の閾値差  $V_{th}$  が加熱処理後に減少している。一般的に、膜厚によって表面吸着物から移動した電荷は指数関数的に (またはそれと似た関数形で) 遮蔽されると考えられる。したがって、膜厚が薄い方が表面吸着物の影響は大きくなる。そのため、加熱処理によって表面吸着物が脱離した影響は、薄い方が大きくなり、厚い部分に対する脱離の影響は小さくなるため、 $V_{th}$  が加熱後に減少したと考えられる [引用文献]

以上のように、分厚い結晶を用いることによって新たに出現する特性の確認とその原因の特定を達成したことで、エッジ終端化効果の調査における注意点を理解できたといえる。

(2) 前項で用いたものと同様の多層 MoS<sub>2</sub> 薄片 FET に関して、フッ素プラズマ処理が動作特性に及ぼす影響について検討した。本研究で採用したフッ素プラズマ処理方法は、テフロンシートを配置した真空容器内で Ar プラズマを発生させることで、間接的に高エネルギーフッ素種を生成する手法である。この手法では、処理対象の試料とテフロンシートの間の距離を変えることで、プラズマ処理の強度を制御できる。図 3(a) 上図に示す通り、近い距離で行った強プラズマ処理においては、n 型伝導の低下 (電界効果移動度としては 0.2 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> V<sup>-1</sup> から一桁低下) と p 型伝導の立ち上がりが見られており、プラズマ処理効果がチャンネル部まで及んでいることが分かる。このことから、MoS<sub>2</sub> 結晶へのダメージが懸念されたため、強プラズマ処理前後で Raman 散乱スペクトルによる確認を試みたところ、処理前後で大きな違いを観測することはできなかった (図 3(b))。Raman 散乱スペクトルのピーク幅は結晶性を定量的に示すものではあるが、少なくとも、Raman 散乱分光で見えるほどの結晶性低下は無いことが分かった。しかしながら、得られた伝達特性からバンドギャップ内の電子トラップ準位密度を抽出したところ (図 3(c) 上図) [引用文献]、状態密度の上昇が見出されたことから、多層薄片を用いているとはいえ、強プラズマ処理ではチャンネルにまで影響が及んでいることが分かった。これは、強プラズマ処理では、多層薄片でも表面側の効果を切り分けられない、ということを示唆するものと考えられる。

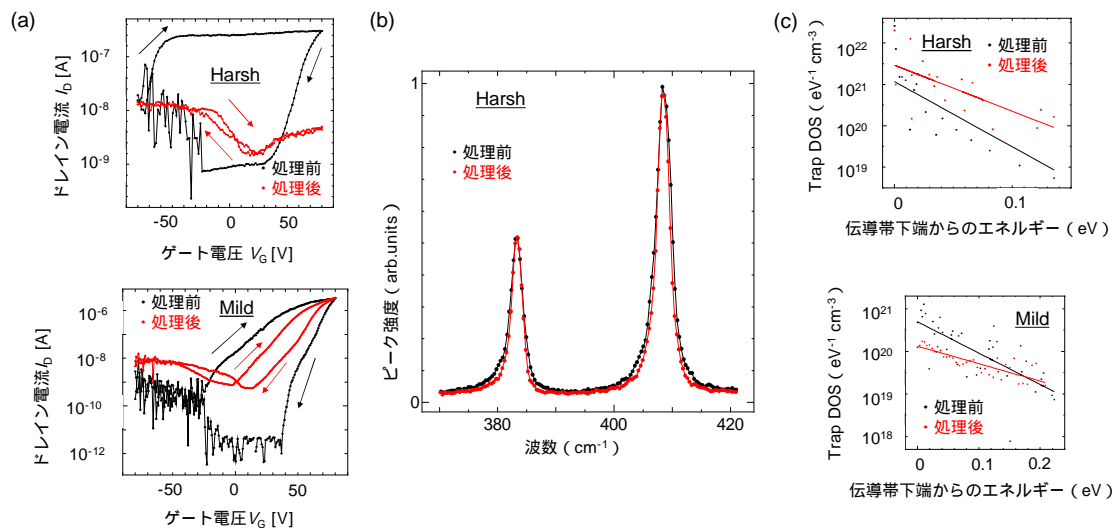


図 3 多層 MoS<sub>2</sub> 薄片を用いた FET に対するフッ素プラズマ処理効果。(a) 強プラズマ処理 (上) および弱プラズマ処理 (下) を施した素子の伝達特性。(b) 強プラズマ処理を施した素子の Raman 散乱スペクトル。(c) 強プラズマ処理 (上) および弱プラズマ処理 (下) を施した素子のバンドギャップ内準位分布の抽出結果。

そこで、距離を離して穏和なプラズマ処理 (図 3(a,c) 下図) を施したところ、処理後にバンドギャップ内電子準位密度の上昇が見られず、表面へのプラズマ処理効果による悪影響がチャンネルにまで及ばない状況を作ることができた。その結果、表面吸着効果を切り分けたエッジのフッ素終端化効果の調査が可能になったと考えられる。フッ素プラズマ処理による FET 特性変化としては、測定時における電圧の往復掃引に伴って生じる電流のヒステリシスが減少すると共に、電界効果移動度の上昇 (5 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> V<sup>-1</sup> から約 2 倍に上昇) が観測された。これは、エッジがフッ素原子で終端化されたことによって疎水化した結果、水分子の吸着が妨げられたためと理解できる。ヒステリシスは FET の作動電圧の印加に伴う水分子の永久双極子の配向により起こるため、水分子の吸着が阻害されることで効果が表れにくくなる。また、ギャップ内準位の状態密度減少が確認されたのは、MoS<sub>2</sub> における主要な欠陥として知られる硫黄欠損が形成する準位 [引用文献] よりエネルギー的に浅い領域であるため、硫黄欠損やダングリングボンドがフッ

素プラズマにより補填される効果[引用文献]ではないと考えられる。水分子の双極子の作る局所電界は、電子・正孔に対して静電的な相互作用を及ぼすことから、水分子の吸着阻害によって静電的な電荷キャリア散乱の強度が減少した結果、移動度が上昇した可能性がある。

以上のように、穏和なプラズマ処理を行うことで、チャンネルに対する表面側からの悪影響を切り分けることができ、エッジ終端化効果を選択的に調査することができる、ということを示唆する結果を得た。

(3) グラフェン FET 構造において、ゲート電圧によってグラフェンの紫外光酸化反応を制御することができる。特に、この反応はエッジ選択的に起こるため、エッジ選択的終端化に関する示唆を与えるものと期待される。本研究では、この光酸化反応におけるグラフェンの化学状態を、高い空間分解能 (~70 nm) で XPS のイメージング計測が可能である、SPring-8 の放射光軟 X 線走査型光電子顕微分光装置 "3Dnano-ESCA" で分析した。その結果、初期光酸化過程においては、特にグラフェンのエッジ領域において、結合状態の変化を伴わない正孔ドープが起き、さらに強く酸化させると、酸化がエッジから内部へと進行することで、酸素分子吸着に伴いグラフェン全体に欠陥が導入されて  $sp^3$  結合が増加することを確認した(図4)。このように、イメージング解析により、ゲート電圧制御型グラフェン光酸化反応における化学状態・電子状態の時空間的ダイナミクスを捉えることに成功した。

本手法は、グラフェン以外の原子層物質(原子層半導体など)にも展開可能な手法であるため、今後、エッジ選択的な反応の化学状態を調査するための強力なツールになるものと期待される。

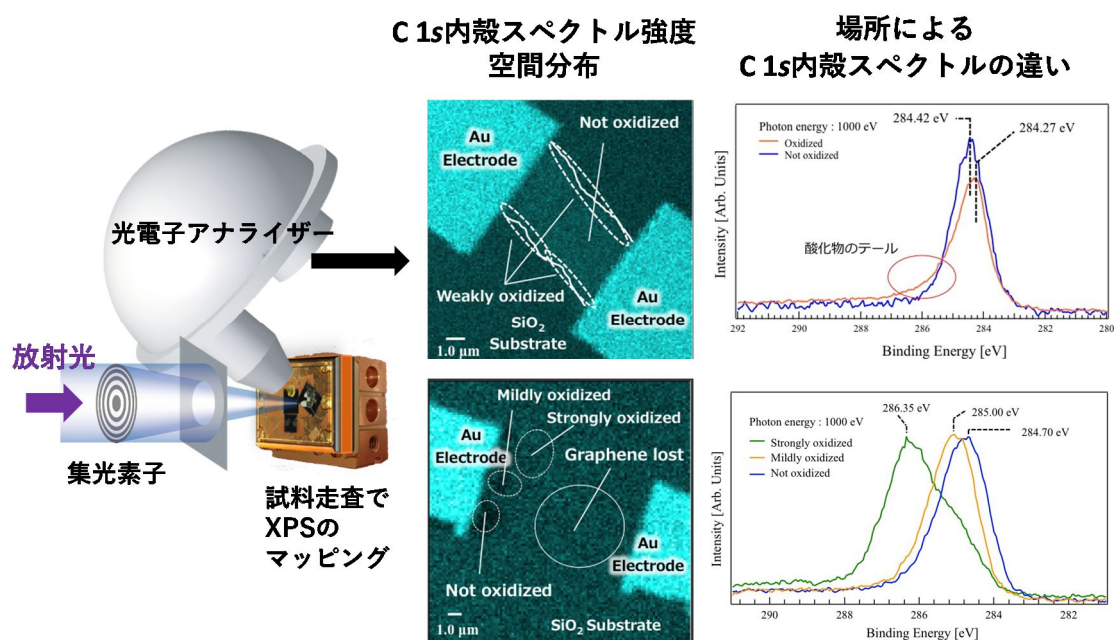


図4 3Dnano-ESCA(左)により測定したゲート電圧制御型グラフェン光酸化反応の化学状態解析。初期酸化過程にある試料(上)と酸化が十分に進行した段階の試料(下)におけるC 1s内殻スペクトルの位置依存性。

<引用文献>

R. Nouchi, J. Appl. Phys. **120**, 064503 (2016).  
 Y. Li *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 16739 (2008).  
 F. Urban *et al.*, 2D Mater. **6**, 045049 (2019).  
 N. Mitoma and R. Nouchi, Appl. Phys. Lett. **103**, 201605 (2013).  
 R. Nouchi *et al.*, J. Mater. Chem. C **7**, 1904 (2019).  
 H. Liu *et al.*, ACS Nano **8**, 1031 (2014).  
 T. Ohoka and R. Nouchi, Nano Express **1**, 010002 (2020).  
 H. F. Haneef *et al.*, J. Mater. Chem. C **8**, 759 (2020).  
 M. Grünewald *et al.*, Phys. Status Solidi B **100**, K139 (1980).  
 B. Zhu *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **22**, 26005 (2020).  
 R. Dhall *et al.*, J. Appl. Phys. **120**, 195702 (2016).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Masaya Sato, Masahiro Hara, Asami Funatsu, Ryo Nouchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Tolerance against conducting filament formation in nanosheet-derived titania thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 10034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959X/ab9024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nouchi, Yoshiaki Ishihara, Susumu Ikeda	4. 巻 10
2. 論文標題 Water permeation pathways in laminated organic single-crystal devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 75312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009912	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nouchi, Kei-ichiro Ikeda	4. 巻 13
2. 論文標題 Adsorbates as a charge-carrier reservoir for electrostatic carrier doping to graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 15005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab5e0b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nouchi, Kei-ichiro Ikeda	4. 巻 22
2. 論文標題 Photochemical reaction on graphene surfaces controlled by substrate-surface modification with polar self-assembled monolayers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 1268-1275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cp05389a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Ohoka, Ryo Nouchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Staircase-like transfer characteristics in multilayer MoS2 field-effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 10002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959X/ab70e6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nouchi	4. 巻 3
2. 論文標題 Field-effect surface chemistry: chemical reactions on two-dimensional materials controlled by field-effect transistor configurations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 24001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959X/ac603f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 4件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Ryo Nouchi, Yoshiaki Ishihara, Masaya Sato, Wataru Sugimoto
2. 発表標題 ELECTRICAL MONITORING OF METHANE OXIDATION USING ATOMICALLY THIN FILMS OF TRANSITION-METAL OXIDE NANOSHEETS
3. 学会等名 International Symposium Catalysis Science - Quo Vadis? (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、池田京一郎
2. 発表標題 電極接合が無い状態でのグラフェンへの電界効果キャリアドーピング
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、石原良晃、杉本渉
2. 発表標題 Operando electrical characterization of methane oxidation with atomically thin films of IrO <sub>2</sub> nanosheets
3. 学会等名 第59回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、石原良晃、杉本渉
2. 発表標題 IrO <sub>2</sub> ナノシート超薄膜を用いたメタン酸化反応の電気的検出
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 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at graphene surface
3. 学会等名 6th International Congress on Microscopy and Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nouchi、Nobuhiko Mitoma、Morihiro Matsumoto、Kei-ichiro Ikeda
2. 発表標題 Gate-Controlled Chemical Modification of Graphene
3. 学会等名 2nd European Conference on Chemistry of Two-Dimensional Materials (chem2Dmat) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 石原良晃、杉本渉、野内亮
2. 発表標題 遷移金属酸化物ナノシート超薄膜を用いたメタン酸化反応の電氣的モニタリング
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 大岡拓也、野内亮
2. 発表標題 多層MoS <sub>2</sub> 電界効果トランジスタで観測される階段状の伝達特性
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 佐藤匡哉、原正大、船津 麻美、野内亮
2. 発表標題 チタニアナノシート膜を用いた抵抗変化型メモリ動作と安定性の評価
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 Ryo Nouchi、Kei-ichiro Ikeda
2. 発表標題 Chemical Modification of Graphene Controlled by Polar Self-Assembled Monolayers
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene & 2D Materials Research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at 2D materials surfaces
3. 学会等名 CA2D: Carrier Doping in two-dimensional layered materials: toward novel physical properties and electronic device applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiaki Ishihara, Wataru Sugimoto, Ryo Nouchi
2. 発表標題 Electrical sensing of methane oxidation with ultrathin films of transition metal oxide nanosheets
3. 学会等名 2019 Materials Research Society Fall Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at surfaces of two-dimensional materials
3. 学会等名 2nd European conference on Smart Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Ohoka, Ryo Nouchi
2. 発表標題 Staircase-Like Transfer Characteristics in Multilayer MoS <sub>2</sub> Field-Effect Transistors
3. 学会等名 The 2nd edition of the 1&2D Materials International Conference and Exhibition (1&2DM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、池田京一郎
2. 発表標題 グラフェンへの電界効果キャリアドーピングにおける電荷キャリア溜めとしての吸着子の働き
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、石原良晃、杉本渉
2. 発表標題 遷移金属酸化物ナノシート単層膜を用いたメタン酸化反応の電氣的モニタリング
3. 学会等名 第58回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮、池田京一郎
2. 発表標題 グラフェンへの電界効果キャリアドーピングにおける電荷注入層としての吸着子
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野内亮
2. 発表標題 酸化イリジウムナノシート超薄膜による室温メタン酸化とその電氣的検出
3. 学会等名 2021年度CREST「革新的触媒」領域公開シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬巧武、野内亮
2. 発表標題 ケルビンプローブによるグラフェン上水吸着のカイネティクス測定と基板表面修飾の効果
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 木井浩喜、野内亮
2. 発表標題 電界効果トランジスタの動作解析による多層MoS <sub>2</sub> に対するフッ素プラズマ処理効果の理解
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 前山滉貴、野内亮
2. 発表標題 ゾルゲルBaSnO <sub>3</sub> 薄膜FETの不安定性と抵抗変化スイッチング現象
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 水上詢、野内亮
2. 発表標題 単一の電流電圧特性を用いた電極接合パラメータの抽出：ルブレン単結晶素子の電荷注入障壁スイッチング現象への適用
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 野内亮
2. 発表標題 電界効果トランジスタによる二次元物質表面反応の制御
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nouchi、Morihiro Matsumoto、Kei-ichiro Ikeda、Nobuhiko Mitoma
2. 発表標題 Gate-Controlled Chemical Reactions at Graphene Surfaces
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nouchi、Yoshiaki Ishihara、Masaya Sato、Wataru Sugimoto
2. 発表標題 Electrical monitoring of CH <sub>4</sub> oxidation with atomically thin films of IrO <sub>2</sub> nanosheets
3. 学会等名 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱比嘉勇人、野内亮
2. 発表標題 貼り付け有機単結晶FETの水誘起動作不安定性に対するソース・ドレイン電極厚さの効果
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〕

研究室ホームページ  
<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe10/>

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	永村 直佳  (Nagamura Naoka)  (40708799)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主任研究員    (82108)	

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