

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06279

研究課題名(和文) 金属を表面吸着させたグラフェンなどの原子層薄膜の電気特性の解明と電子デバイス応用

研究課題名(英文) Electrical properties and application to electronic devices on metal-adsorbed two-dimensional materials such as graphene

研究代表者

藤元 章 (FUJIMOTO, Akira)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90388348

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンや二硫化モリブデンを人工的に積層した半導体接合を作製し、抵抗検知型のガスセンサを作製した。水素ガスと一酸化窒素ガスの検知特性を調べ、グラフェン単体よりも、グラフェン/二硫化モリブデンのヘテロ接合の抵抗変化が大きいことを確認した。ヘテロ接合の場合、一酸化窒素ガスを10 ppmから100 ppmの範囲で変化させると、それに応じてステップ状の抵抗変化が得られた。酸化インジウムの薄膜をグラフェン上に成長させた試料でガスセンシング特性を評価し、100 ppmの一酸化窒素ガスでは、2桁以上の抵抗の増大が観測され、ガスセンサの高感度化が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、グラフェン表面にチタンを蒸着させ、その膜を除去することで、トランジスタの両極性動作に成功した。この研究がグラフェン上に様々な異種材料を積層させて研究を始める契機となった。さらに、グラフェンと二硫化モリブデンとを組み合わせたデバイスを実現し、100 ppm以下の濃度でNOガスの連続モニタリングに成功し、数十秒の応答速度が得ることができた。このような原子層薄膜表面の化学的な変化を電気信号に変換して計測することができるポテンシオメトリックセンサーが、リアルタイムで化学種の吸着をモニタリングするための新デバイスに発展することを期待する。

研究成果の概要(英文)： We made the semiconductor junction consisting of graphene and molybdenum disulfide, which transduces gas-molecules adsorption on the surface and the interface into a change of the resistance. We measured the resistance by flowing hydrogen and NO gases, and confirmed that the resistance of the semiconductor junction was larger than that of single-layer graphene. Furthermore, by increasing the flow rate of the NO gas from 10 ppm through 100 ppm, a step-like change of the resistance was observed, and we confirmed the change of the resistance responded to the flow rate of NO gas. We also evaluated the gas sensing for indium oxide thin film on graphene and observed the increase of resistance by more than two orders, comparing with that of single-layer graphene. We expect the high sensitivity as a gas sensor by using indium oxide thin film on graphene.

研究分野：半導体デバイス物性

キーワード：グラフェン 二硫化モリブデン 酸化インジウム ガスセンサ

## 1. 研究開始当初の背景

グラフェン関連の物性研究は国内外で急速に進展し、波数空間の特異点であるDirac点周囲のBerry位相による $\pi$ のずれを反映し、後方散乱消失による弱反局在効果などが発現する。グラフェンの応用上では、2層のグラフェンに、トンネル絶縁膜を挟んだ構造である対称グラフェントンネル電界効果トランジスタ(Symmetric FET: SymFET)が提案されている。研究代表者の関与する先行研究では、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ のALD(Atomic Layer Deposition)トンネル絶縁膜をはさんだ2層グラフェンのSymFETを作製し(Roy and Fujimoto, *Microelectronics Engineering* 2013),  $I_{\text{on}}$ と $I_{\text{off}}$ の比が約 $10^6$ であり、従来のSiトランジスタと同程度もしくはそれ以上の性能があることを見出した。さらに、デバイス作製時に重要になるのは、グラフェン表面を清浄化することである。図1に、チタンクリーニングされた単層グラフェンの77 Kにおける縦抵抗( $\rho_{xx}$ )のゲート電圧( $V_G$ )依存性を示す。チタンクリーニングにより、グラフェンデバイスの電荷中性点を $V_G = 0$  V付近にシフトさせ、キャリア移動度を向上させることができる (Fujimoto, *J. Phys. Conf. Series*, 2014)。

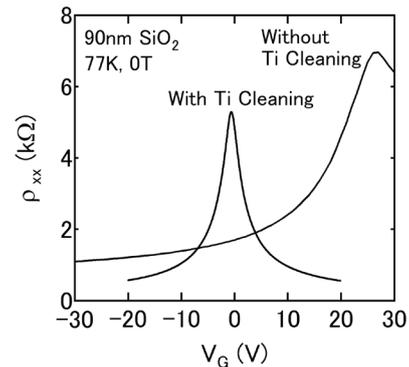


図1 チタンクリーニングされた単層グラフェンの77 Kにおける縦抵抗( $\rho_{xx}$ )のゲート電圧( $V_G$ )依存性。電荷中性点が  $V_G = 0$  V 付近にシフトしている。

遷移金属ダイカルコゲナイド(Transition Metal Dichalcogenide: TMD)の1つである二硫化モリブデン( $\text{MoS}_2$ )は、グラフェンと違いバンドギャップを持つため、OFF電流の小さいトランジスタへの応用が期待されている。我々の研究グループでも  $\text{MoS}_2$  の原子層薄膜トランジスタを作製し、その動作確認をすることができた。グラフェンとグラフェンの間に2次元原子層薄膜を挿入したデバイスについても、2016年度から作製を始めた。これらの原子層薄膜の研究は、これらの材料を組み合わせたファンデルワールスヘテロ接合や、原子層薄膜表面に異種原子・分子を吸着させた系(Ludbrook, arXiv 1508.05925v2, 2015)などに注目が集まり、その電子デバイス応用に向けた研究が世界各地で進められている。グラフェン表面に数 nm の  $\text{ZnO}$  薄膜を ALD (Atomic Layer Deposition) 成長させた試料では、ホルムアルデヒドガス分子に応答することも報告され (Mu, *Appl. Phys. Lett.*, 2014), 表面体積比が大きいことを生かし、ガスセンサデバイスとしての発展が期待される。

## 2. 研究の目的

グラフェンにおける Dirac 電子系の特異な物性を見るためには、これらの原子層薄膜の表面状態の改善や、グラフェンベースの新しいデバイス構造が必要で、これらの実験的研究を行う。また、人工的に積層したファンデルワールスヘテロ構造を作製し、ガスセンサなどのデバイス応用を目指した。下記の3つを主な課題とし、単層および積層構造を用いて行った。

### (1) チタンクリーニングを行った単層グラフェンと対称トンネル電界効果トランジスタ(SymFET)の弱局在効果

チタンクリーニングとは、チタンをグラフェン表面に一度吸着させた後、フッ酸で除去する表面清浄化プロセスである。このチタンクリーニングを行っていない単層グラフェントランジスタとチタンクリーニングを行ったデバイスの弱磁場領域の磁気抵抗を調べ、弱局在効果を観測する。チタンクリーニングにより、非弾性散乱長や谷間散乱長がどの程度変化するかを定量化し、SymFETの動作の物理的根拠を担い、そのデバイス特性向上に繋げる。

### (2) 酸化物やアルカリ金属を吸着させた原子層薄膜の電気特性と超伝導

グラフェン表面に異種原子・分子を吸着させた系などに注目が集まっている。グラフェン表面に数nmの $\text{ZnO}$ 薄膜をALD成長させた試料では、ホルムアルデヒド分子に応答するガスセンサデバイスの可能性もあり、ナノ構造とグラフェンの組み合わせも研究対象になりつつある。アルカリ金属が吸着・ドーピングされたグラフェンや $\text{MoS}_2$ の電気特性・超伝導特性を調べ、半導体-金属-超伝導転移を観測する。 $\text{KCl}$ などのアルカリハライド結晶を原子層薄膜上に置いて、高温で融解させてアニールする。これにより、原子層薄膜の表面にアルカリ金属を吸着させ、もしくはアルカリ金属をドーピングすることが可能であると考えられる。

### (3) 原子層薄膜を用いた2層構造・ヘテロ構造のデバイス作製と特性評価

グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)の $\text{MoS}_2$ などを積層した複合原子層であるファンデルワールスヘテロ構造を作製し、OFF電流の小さいトンネル電界効果トランジスタの動作確認を行う。表面体積比が大きいことを生かして、ガスセンサデバイスの作製を進める。

### 3. 研究の方法

(1) Cu 上の CVD グラフェンを溶液プロセスにより Si 基板/ SiO<sub>2</sub> (90 nm または 268nm) 上に転写した。グラフェンホールバーを作製するために、酸素プラズマでグラフェンをエッチングし、その後、Ni (30 nm)/Au (30 nm) のソース/ドレイン電極をスパッタリングとリフトオフプロセスで作製した。チタンクリーニングプロセスは、電子ビーム蒸着により 2 nm の Ti をグラフェン表面に付け、その Ti を空气中で酸化させた後、フッ酸で TiO<sub>x</sub> を除去することにより行った。6T まで印加できる超伝導マグネットを備えた約 4.5K まで冷却可能な低温電気抵抗測定システムを用い、グラフェントランジスタの磁気抵抗測定を行った。

(2) カルボン酸インジウム有機錯体を原料とし、300°C から 350°C くらいで溶媒なしで数時間加熱する化学的な熱分解法により、トルエン中に分散した In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子を作製した。このナノ粒子の粒径は約 30 nm である。X 線回折測定の結果から、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の立方晶が形成されていることを確認している。フォトレジストの開口部に In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子が入るように、スピコートを行い、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子が付いたグラフェントランジスタを作製した。

CVD グラフェンが転写された Si 基板上の試料に、真空蒸着装置を用いてインジウムを 15 nm 蒸着し、インジウム/グラフェン試料を作製した。van der Pauw 法を用い、作製したインジウム/グラフェン試料のシート抵抗の温度依存性を調べた。また、真空蒸着装置を用いてグラフェン上に KCl を堆積させ、加熱処理により、アルカリ金属の K のドーピングを試みた。

(3) グラフェン/h-BN/グラフェンのファンデルワールスヘテロ接合

ジョージア工科大学の Eric M. Vogel 教授の研究室の協力の下で、図 2 に示すような 2 層のグラフェン間に h-BN をトンネル絶縁膜としたトンネル電界効果トランジスタ型のデバイスを作製した。h-BN はホットウォール型の炉で作製し、試料の膜厚が 3~7 層であることを透過型電子顕微鏡での観察から確認している[8]。このデバイスを用い、クーロンドラッグの測定を試みた。クーロンドラッグは、クーロン相互作用を介して半導体 2 層系のキャリア間で運動量の遷移が起こる現象で、電子間相互作用を直接測定できる方法である。

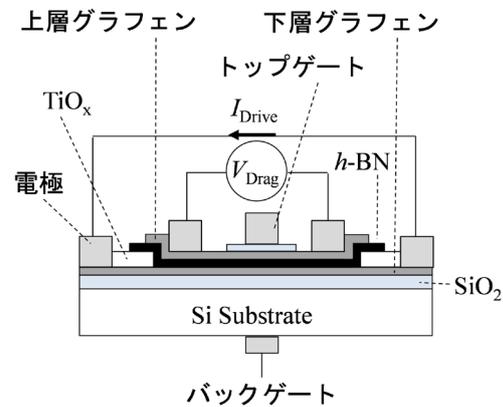


図 2 2 層グラフェンのトンネル電界効果トランジスタとクーロンドラッグの測定配置図

(4) 二硫化モリブデンの作製とファンデルワールスヘテロ接合の作製

酸化膜付きの Si 基板上に、1 nm の Mo を電子ビーム蒸着装置で堆積させ、その後、900 °C の炉内で 1 時間硫化させることにより二硫化モリブデン薄膜を作製した。ラマン散乱測定

の結果、二硫化モリブデンは 3 層であることが分かり、その二硫化モリブデンのトランジスタ動作も確認した。グラフェンと二硫化モリブデンのファンデルワールスヘテロ接合を作製した。市販されている単層の CVD グラフェンと我々が作製した MoS<sub>2</sub> を用いて、ファンデルワールスヘテロ接合を溶液プロセスで作製した。MoS<sub>2</sub> 上に PMMA(ポリメチルメタクリレート)を塗布し、フッ酸で Si/SiO<sub>2</sub> 基板をエッチングすることにより、MoS<sub>2</sub> 薄膜を取り出した。電極が形成された単層の CVD グラフェンのトランジスタ上に、溶液中でこの MoS<sub>2</sub> 薄膜を転写した。今回作製したファンデルワールスヘテロ接合において、電極を低抵抗のグラフェン側に作製しているため、電気抵抗測定を行った際には、グラフェンと比べて高抵抗の MoS<sub>2</sub> には電流がほとんど流れないと推察される。

#### 4. 研究成果

(1) 電子の伝導領域では、高磁場側では負の磁気抵抗が一定になり、高温では負の磁気抵抗が小さくなる。一方、電荷中性点領域では、高磁場側では磁気抵抗が負から正に転じ、高温では負の磁気抵抗が小さくなり、強い正の磁気抵抗が現れる。これらの結果を McCann の単層グラフェンの弱局在の理論式でフィッティング解析し、非弾性散乱確率( $1/\tau_\phi$ )の温度依存性の結果を図 3 に示す。電荷中性点領域と電子領域・正孔領域とで温度依存性が異なるのが分かる。電荷中性点領域では、 $1/\tau_\phi$ が低温側で飽和し、高温側では温度に対して直線的に変化している。一方、電子領域・正孔領域では、 $1/\tau_\phi$ が低温側で飽和し、高温側で温度の 2 乗の関係であることが分かった。電荷中性点領域では Nyquist 散乱が寄与し、電子領域・正孔領域では、電子-電子散乱が効いていると考えられる。また、低温での非弾性散乱確率の飽和は、電子-正孔パドルにより、キャリアの伝導パスが制限されていることに起因すると考えられる。チタンクリーニングされたグラフェンの弱局在効果を調べることで、電荷中性点領域や電子領域、正孔領域での量子輸送特性を明らかにでき、SymFET の動作条件を満たすことが分かった。

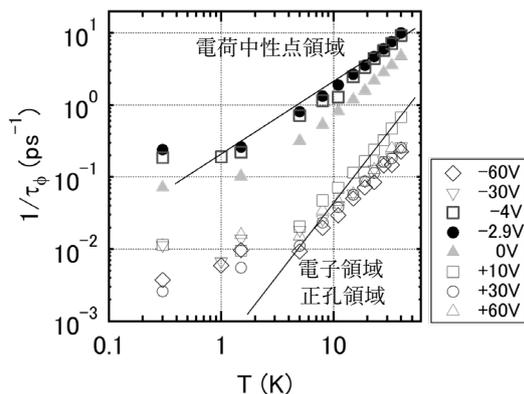


図 3 非弾性散乱確率( $1/\tau_\phi$ )の温度依存性

(2) 図 4 に、グラフェントランジスタと  $\text{In}_2\text{O}_3$  ナノ粒子が付いたグラフェントランジスタの  $V_G-I_D$  (ドレイン電流)特性を示す。これは、室温での測定結果で、ソース-ドレイン間の電圧は 50 mV である。 $\text{In}_2\text{O}_3$  ナノ粒子をグラフェン上にのせた時、 $I_D$ が増加している。これは  $\text{In}_2\text{O}_3$  ナノ粒子が伝導パスとなることに起因する。また、電荷中性点が高ゲート電圧側にずれていることがわかる。これは、グラフェン中の電子が  $\text{In}_2\text{O}_3$  ナノ粒子中に抜き取られたことにより、 $p$  型にシフトし、グラフェン中の電子数が減少したためと予想される。さらに、 $V_G$ の正の領域の電子伝導領域で、 $V_G$ を増加させても、 $I_D$ が抑制され十分に増加しない。これはグラフェン中の電子数の側面だけでなく、電子の移動度が劣化している可能性がある。

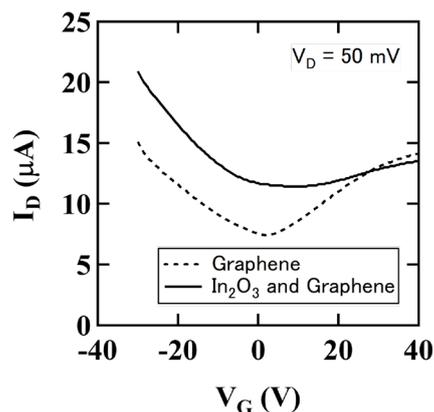


図 4 グラフェントランジスタとレジスト開口部に酸化インジウムナノ粒子が入ったグラフェントランジスタの特性

(3) インジウム/グラフェン試料のシート抵抗を調べると、低温では超伝導状態が観測されなかった。グラフェン試料と比べ、インジウム/グラフェン試料のシート抵抗の温度依存性が小さい。インジウムがグラフェンに対してドナーとして働き、単層のグラフェン試料に比べて抵抗が下がると予測したが、実験結果はその逆で抵抗値が上昇した。インジウム/グラフェン試料と単層のグラフェン試料のキャリア密度の違いを調べるために、Hall 効果測定を行った。単層のグラフェン試料は、インジウム/グラフェン試料の 4 倍以上の正孔密度を持っているため、インジウム/グラフェン試料よりも、シート抵抗が低い要因であると分かる。インジウム/グラフェン試料が単層のグラフェン試料よりも正孔密度が低下したことに関して、次のようなことが考えられる。インジウムの仕事関数は 4.09eV、グラフェンの仕事関数は 4.5 eV である。実験結果から単層のグラフェン  $p$  型であることが分かっているため、グラフェンのフェルミ準位  $E_F$  は Dirac 点よりも下の位置に存在し、真空準位からフェルミ準位  $E_F$  間のエネルギーは 4.5eV よりも大きい。インジウム中の電子はエネルギーの低いグラフェンの価電子帯に侵入し、グラフェンの正孔と打ち消し合う。それにより、インジウム/グラフェン試料の正孔密度が小さいということが考えられる。また、KCl/グラフェン試料でも、低温では超伝導状態が観測されなかった。

(4) 実験的には、図2に示すように、下層グラフェンにドライブ電流( $I_{\text{Drive}}$ )を流し、上層グラフェンでドラッグ電圧( $V_{\text{Drag}}$ )を測定する。室温での測定結果を図5に示す。図5の縦軸のドラッグ抵抗( $\rho_{\text{Drag}}$ )は、 $V_{\text{Drag}}$ を $I_{\text{Drive}}$ で割った式で定義される。 $I_{\text{Drive}}$ が $\pm 1\mu\text{A}$ のときの $\rho_{\text{Drag}}$ は約 $60\Omega$ であり、 $h\text{-BN}$ をトンネル絶縁膜として2層グラフェンのクーロンドラッグの測定を行ったGorbachevらの結果と、 $\rho_{\text{Drag}}$ の大きさが同程度であることは確認できた。

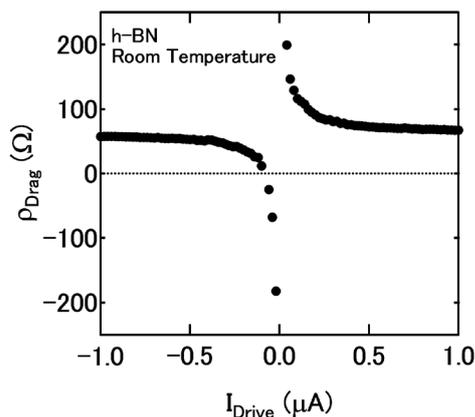


図5 室温におけるドラッグ抵抗のドライブ電流依存性。

(5) 単層のCVDグラフェンのみを用いて、1000 ppmの $\text{H}_2$ ガスと100 ppmのNOガスをそれぞれ流したときの抵抗変化を調べた。1000 ppmの $\text{H}_2$ ガスに対して抵抗変化が非常に小さく、NOガスについては乾燥空気中では $\text{NO}_2$ に変化すると考えられるが、約3%の抵抗変化があることが分かった。

単層のCVDグラフェンと $\text{MoS}_2$ のファンデルワールスヘテロ接合の $\text{H}_2$ ガスとNOガスをそれぞれ流したときの抵抗変化の様子を図6と図7に示す。横軸は測定時間、縦軸は抵抗変化率を表す。図6に示すように、1000 ppmの $\text{H}_2$ ガスを流した場合、単層のCVDグラフェンのみの場合と異なり、電気抵抗は大きく上昇し、約20%の抵抗変化が確認できた。その後、乾燥空気のアエガスのみを再度流したとき、電気抵抗が元の値に回復した。また、図7に示すように、NOガスを10 ppmから100 ppmの範囲で変化させると、それに応じてステップ状の抵抗変化が得られた。このステップ状の変化は、グラフェン単体での測定では観測することができなかった。100 ppmのNOガスに対し、グラフェンと $\text{MoS}_2$ のファンデルワールスヘテロ接合では最大約5%の抵抗変化率を示した。

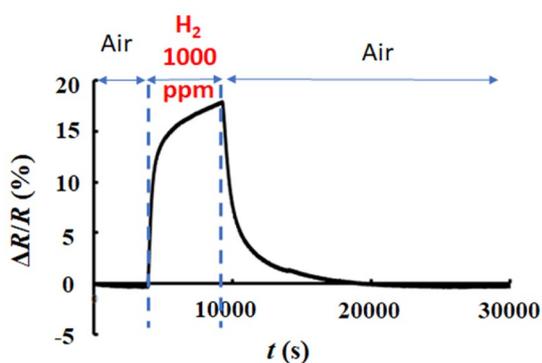


図6  $\text{H}_2$ ガスを1000 ppm流したときのグラフェン/ $\text{MoS}_2$ ヘテロ接合の抵抗変化

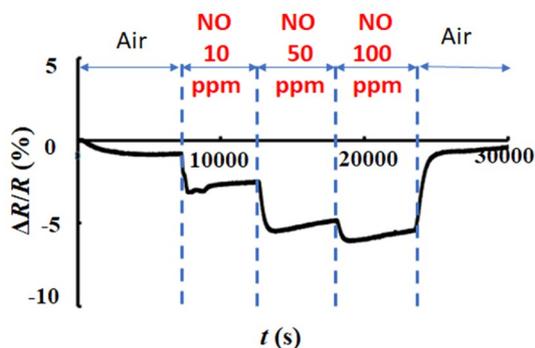


図7 NOガスの濃度を変化させながら測定したときのグラフェン/ $\text{MoS}_2$ ヘテロ接合の抵抗変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Akira Fujimoto, Christopher J. Perini, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Yoshiyuki Harada, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Eric M. Vogel	4. 巻 1800541
2. 論文標題 Disorder and Weak Localization near Charge Neutral Point in Ti-cleaned Single-Layer Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1800541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201800541	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 該当する
1. 著者名 Syoji Yamada, Akira Fujimoto, Siro Hidaka, Yasutaka Imanaka, Masashi Akabori, Kanji Takehana	4. 巻 9
2. 論文標題 Fractional quantum Hall effects in In <sub>0.75</sub> Ga <sub>0.25</sub> As bilayer electron systems observed as “Finger print”	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7446-1-7446-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-43290-8	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 Ryotaro Sekine, Mizuki Uenomachi, Hiroki Asafusa, Kazuyasu Tokiwa, Kenji Shimazoe, Hiroyuki Takahashi, Yoshiyuki Harada, Akira Fujimoto, Takeshi Hirai, and Shiro Sakuragi	4. 巻 19
2. 論文標題 Growth and Characterization of CdTe Single Crystals Prepared by the “Liquinert Processed” Vertical Bridgman Method for Radiation Detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 6218-6223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.9b00706	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 D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Kanai, K. Matsumoto	4. 巻 1800515
2. 論文標題 Universal Conductance Fluctuation due to Development of Weak Localization in Monolayer Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1800515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201800515	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 A. Fukuda, D. Terasawa, A. Fujimoto, Y. Kanai, K. Matsumoto	4. 巻 969
2. 論文標題 Magnetotransport of the Monolayer Graphene Adsorbed by the Inert Gas In The Quantum Hall Regime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 12130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012130	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 D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, and K. Matsumoto	4. 巻 267
2. 論文標題 Temperature dependence of universal conductance fluctuation due to development of weak localization in graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Solid State Communicaion	6. 最初と最後の頁 14-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssc.2017.09.002	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 D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, Y. Kanai, and K. Matsumoto	4. 巻 95
2. 論文標題 Relationship between conductance fluctuation and weak localization in graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.125427	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23件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 藤元章, 井須亮太, 前田翔児, Christopher J. Perini, 寺澤大樹, 福田昭, 小山政俊, 原田義之, 小池一步, 矢野満明, 塚越一仁, Eric M. Vogel
2. 発表標題 酸化インジウムを積層させたグラフェンのガスセンシング評価
3. 学会等名 2020年第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 山田省二, 藤元章, 添田幸伸, 赤堀誠志
2. 発表標題 CoFe-InGaAs 2次元電子ガス系におけるスピバルブ動作のゲート制御
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 Akira Fujimoto
2. 発表標題 Large-Area Synthesized Molybdenum Disulfide and Chemical Vapor Deposited Graphene for Application of Gas Sensor
3. 学会等名 Energy Materials Nanotechnology Rome Meeting on Carbon Nanostructures 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Fujimoto, Shoji Maeda, Ryota Isu, Kei-ichi Sakamoto, Kentaro Matano, Masatoshi Koyama, Yoshiyuki Harada, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano
2. 発表標題 Large-Area Chemically Synthesized Molybdenum Disulfide with Aqueous Thermolysis Method
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji Maeda, Ryota Isu, Christopher J. Perini, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Masatoshi Koyama, Akira Fujimoto, Yoshiyuki Harada, Kazuto Koike, Mitsuaki Yano, Eric M. Vogel
2. 発表標題 Characteristics of Gas Sensor Based on Molybdenum Disulfide/Graphene van der Waals Heterostructure
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤元章, 前田翔児, 井須亮太, 阪本恵一, 俣野健太郎, 寺澤大樹, 福田昭, 小山政俊, 原田義之, 小池一步, 佐々誠彦, 矢野満明
2. 発表標題 ガスセンサー応用に向けた二硫化モリブデンとグラフェンのファンデルワールスヘテロ接合
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田省二, 藤元章, 日高志郎, 赤堀誠志
2. 発表標題 InGaAs 2次元電子ガス2層系におけるスピン軌道相互作用の機構解明
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田翔児, 井須亮太, C. J. Perini, 寺澤大樹, 福田昭, 小山政俊, 藤元章, 原田義之, 小池一步, 矢野満明, E. M. Vogel
2. 発表標題 二硫化モリブデン グラフェンのファンデルワールス ヘテロ構造を用いたガスセンサの評価
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 前田翔児, Christopher J. Perini, 金子豊和, 寺澤大樹, 福田昭, 小山正俊, 藤元章, 原田義之, 小池一步, 矢野満明, Eric M. Vogel
2. 発表標題 3層MoS2トランジスタの作製と電気特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺澤大樹, 福田昭, 藤元章, 金井康, 松本和彦, 大岩顕
2. 発表標題 架橋構造グラフェンを用いた希ガスセンシング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Fujimoto, Christopher Perini, Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Yoshiyuki Harada, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Eric Vogel
2. 発表標題 Disorder and Weak Anti-Localization near Charge Neutral Point in Ti-cleaned Single-Layer Graphene
3. 学会等名 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daiju Terasawa, Akira Fukuda, Akira Fujimoto, Ohno Yasuhide, Kanai Yasushi, Matsumoto Kazuhiko
2. 発表標題 Universal Conductance Fluctuation due to development of Weak Localization in graphene
3. 学会等名 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤元章, 上間康司, Christopher Perini, 寺澤大樹, 福田昭, 佐々誠彦, Eric Vogel
2. 発表標題 チタンクリーニングされた単層グラフェンの電荷中性点付近の $R_{xx}$ , $R_{xy}$ の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ota, M. Nishioka, A. Fujimoto, Y. Kashiwagi, M. Saitoh, M. Nakamoto, Y. K. Zhou, B. Liu, C. Xing-Heng, Y. Harada, T. Kamimura
2. 発表標題 Spin Scattering from Dysprosium Atoms in Indium Tin Oxide Thin Films Produced by Sol-Gel Method
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yamada, A. Fujimoto, S. Hidaka, M. Akabori, Y. Imanaka and K. Tekehana
2. 発表標題 Quantum Hall effect in In <sub>0.75</sub> Ga <sub>0.25</sub> As bilayer 2DEG with similar sheet electron densities
3. 学会等名 Spin Tech 9-International School and Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Hidaka, A. Fujimoto, S. Yamada and M. Akabori
2. 発表標題 Weak anti-localization in In <sub>0.75</sub> Ga <sub>0.25</sub> As two-dimensional electron gas bilayer samples
3. 学会等名 Spin Tech 9-International School and Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤元 章, 小山 政俊, 原田 義之, 小池一步, 佐々誠彦, 矢野満明
2. 発表標題 異種材料を積層させたグラフェンのラマン散乱と電気特性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤元章, 長尾祥吾, 三木孝浩, 寺澤大樹, 福田昭, 太田椋也, 大東隆文, 小山政俊, 原田義之, 神村共住, 佐々誠彦, 矢野満明
2. 発表標題 酸化インジウムナノ粒子を表面吸着させた グラフェンの電気特性
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nishioka, Y. Kashiwagi, M. Saitoh, M. Nakamoto, Y. K. Zhou, B. Liu, C. Xing-Heng, R. Oota, A. Fujimoto, Y. Harada, T. Kamimura
2. 発表標題 Synthesis and Magnetic properties of dysprosium doped indium tin oxide nanoparticles by chemical thermolysis
3. 学会等名 2016 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Yamada, Y. Soeda, M. Akabori, A. Fujimoto, Y. Imanaka, K. Takehama
2. 発表標題 Subband transport and quantum Hall effect in InGaAs/InAlAs 2DEG bilayer with surface inversion layer
3. 学会等名 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Yamada, H. Iwase, Y. Soeda, M. Akabori, A. Fujimoto
2. 発表標題 Measurement of resonant spin Hall effect in InGaAs 2DEG bilayer system
3. 学会等名 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 寺澤 大樹, 福田 昭, 藤元 章, 大野 恭秀, 金井 康, 松本 和彦
2. 発表標題 グラフェンにおける伝導度ゆらぎの磁場依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤元章, 大森理史, 長尾祥吾, 三木孝浩, 先田雅史, 太田棕也, 大東隆文, 小山政俊, 原田義之, 神村共住, 佐々誠彦, 矢野満明
2. 発表標題 金属やナノ粒子を表面吸着させたグラフェンの電気特性とラマン分光
3. 学会等名 日本材料学会 平成28年度 半導体エレクトロニクス部門委員会・ナノ材料部門委員会 合同研究会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>酸化半導体や原子層薄膜を用いた透明な高感度の電子デバイスの実現  <a href="http://www.oit.ac.jp/oitp/introduction/detail12.html">http://www.oit.ac.jp/oitp/introduction/detail12.html</a>  <a href="http://www.oit.ac.jp/japanese/sangaku/pdf/sd0066.pdf">http://www.oit.ac.jp/japanese/sangaku/pdf/sd0066.pdf</a>            グラフェントランジスタ  <a href="http://www.oit.ac.jp/japanese/sangaku/pdf/sd0067.pdf">http://www.oit.ac.jp/japanese/sangaku/pdf/sd0067.pdf</a>            ナノ材料マイクロデバイス研究センター ナノ材研プロジェクト第5回研究会  <a href="http://www.oit.ac.jp/japanese/news/eng_detail.php?id=201701002">http://www.oit.ac.jp/japanese/news/eng_detail.php?id=201701002</a></p>
--

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
連携研究者	原田 義之  (HARADA Yoshiyuki)  (20288757)	大阪工業大学・工学部・教授    (34406)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	佐藤 和郎 (SATO Kazuo) (30315163)	地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・制御・電子材料系・主任研究員  (84415)	
連携研究者	村上 修一 (MURAKAMI Syuichi) (70359420)	地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・制御・電子材料系・主任研究員  (84415)	