

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00755

研究課題名(和文) 2Dヘテロ界面特性の理解に基づく2DトンネルFETの構築

研究課題名(英文) 2D tunnel FET based on understanding of 2D hetero interface characteristics

研究代表者

長汐 晃輔 (Kosuke, NAGASHIO)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：20373441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：低消費電力化だけでなくトンネル距離をvan der Waals距離にまで低減し高い駆動電流の実現が可能な二次元トンネルFETが研究されている。本研究では、相補的動作を目指しN+型2次元結晶探索を行いSnS<sub>2</sub>がトンネルFETに対する高濃度n型結晶として適していることを見出した。さらに、完全縮退のため安定なP+型を示すP+MoS<sub>2</sub>/N-MoS<sub>2</sub>ヘテロ構造及び、界面準位を低減できるh-BNをゲートに選択し、チャネルのバンドギャップの層数依存性に着目してS.S.をMOSFETの理論限界値である60 mV/dec以下の51 mV/decのS.S.を達成した。本結果は、超低消費電力に繋がる成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTデバイス数は、数年後には～400億個に達すると指摘されているが、電子デバイスの超低消費電力化が普及の鍵である。本研究では、従来のSiトランジスタ動作の急峻性を表すSSにおいて理論限界値である60 mV/dec以下の51 mV/decを達成した。本成果は、低消費電力デバイスとして期待がかかる二次元トンネルFETの低消費電力動作を実証したものであり、今後の展開が大いに期待される。

研究成果の概要(英文)：Two-dimensional tunnel FETs (2D-TFETs) that can realize high drive current by reducing the tunnel distance to van der Waals distance as well as low power consumption have been intensively studied. In this study, we investigated high concentration N-type two-dimensional crystals aiming at complementary operation and found that SnS<sub>2</sub> is suitable as a high-concentration N-type crystal for TFET. Furthermore, a P+MoS<sub>2</sub>/N-MoS<sub>2</sub> heterostructure tunnel FET was fabricated with h-BN gate dielectric. Finally, we achieved SS of 51 mV / dec, which is less than the theoretical limit of 60 mV/dec of MOSFET. This result is high impact to ultra-low power consumption.

研究分野：半導体工学

キーワード：超低消費電力 トンネル現象 電界効果トランジスタ 二次元材料

### 1. 研究開始当初の背景

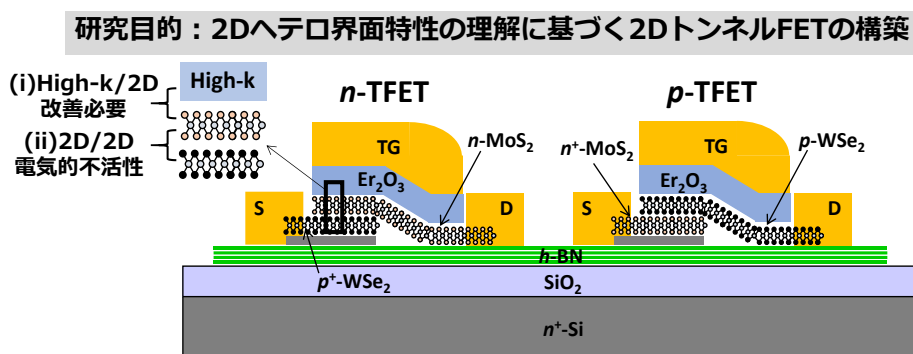
2 次元(2D)層状物質は、面内はすべて共有結合で閉じており“理想的には”本質的に電氣的に不活性である。さらに 2D-2D 積層においては、格子定数の不整合性とは無関係に自在に積層することが可能である。しかしながら、2 次元材料の輸送特性に関しては、非常に多くの報告があるものの、2D と high-k 絶縁膜界面、2D-2D 界面が“実験的に”電氣的に不活性であるかどうかは殆ど詳細には調べられていない状態であった。我々は、2 次元層状物質は、面内で結合が閉じていることでダングリングボンドは存在しないが、単層 MoS<sub>2</sub> は原子レベルでの平坦性を担保した場合のみ、ほぼ理想的な電氣的に不活性な界面状態が実現できることを見出してきた。このような自身の結果を背景に、本研究では今後益々重要となる超低消費電力デバイスに対して、この原子レベルで平坦な電氣的に不活性な界面を適応することを試みた。

### 2. 研究の目的

IoT デバイス数は、数年後には～400 億個といった数に達すると指摘されている。この数のデバイスを有線電源につなげることは困難であることから、IoT デバイス自身で普遍的に存在する環境のエネルギーから電気エネルギーを獲得する環境発電技術に関する研究が盛んに行われているが、目標である 100 uW には厳しいのが現状である。これは、既存の IoT デバイス内で動作するトランジスタの消費電力が高いためであり、トランジスタの超低消費電力化により IoT デバイスは急速に普及すると期待できる。低消費電力化のためには、MOSFET の 60 mV/dec よりも低い SS を可能とする新しい原理に基づいたデバイスが要求され、トンネル FET が有望である。このトンネル FET は、type III のバンドアライメントにおいて、ソースから電子をバンド間トンネルによりチャネルに注入することで動作させるデバイスである。ソースに存在するキャリアのボルツマン分布は禁制帯によりカットされているため、原理的に 60 mV/dec を切ることが可能であり、Si, SiGe, III-V 等ですでに報告されている。しかしながら、トンネルを利用することで推測されるように 3 次元半導体界面における長いトンネル距離のためオン電流は低く制限されてしまうことが問題であり、3 次元半導体界面に本質的な問題である。

ここで、原子レベルで平坦で電氣的に不活性な 2D-2D ヘテロ界面をトンネル FET に適応することで、トンネル距離を理想的には層間距離である van der Waals 距離(～0.3 nm)にまで低減できると考えられ、欠点であったオン電流向上へのブレークスルーとなる可能性がある。これまでの取り組みとして 2D-2D トンネル FET において、バンド間トンネルは実証したが、SS が大きいというのが現状である。これは、2D-2D トンネル FET のデバイス構造においては、(i)high-k/2D 界面と(ii)2D/2D 界面の 2 種類が存在する。これまでの結果では、2D/2D 界面は電氣的に不活性な界面を達成しているが、high-k/2D 界面は、high-k 絶縁膜堆積による歪により大量のバンドテイル型の界面準位が形成されていることが分かっている。以上を踏まえ、本研究の目的は、2D チャネル上にダメージフリーで high-k を堆積する技術を構築し、全固体 2D-

2D トンネル FET により MOSFET の理論限界である 60 mV/dec 以下の SS を達成することである。



### 3. 研究の方法

電荷移動型  $p^+$ -WSe<sub>2</sub> は WSe<sub>2</sub> をオゾン酸化後に WO<sub>x</sub> を  $h$ -BN と積層することで形成した。WO<sub>x</sub> は仕事関数が 6 eV 程度と高く WSe<sub>2</sub> から電子を奪い WSe<sub>2</sub> は  $p^+$ 化する。 $p^+$ -WSe<sub>2</sub> を  $n$ -MoS<sub>2</sub>(1 ~ 5 層(L))と位置合わせ装置を用いて積層し  $p^+$ -WSe<sub>2</sub>/ $n$ -MoS<sub>2</sub> ヘテロ構造を形成した。電子線リソグラフィにより Ni/Au 電極を形成後、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層及び ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(~30 nm)を堆積しトップゲート絶縁膜とした。最後にトップゲート Al 電極を形成し、Fig. 1 に示すような  $p^+/n$  2D-TFET デバイスを作製した。一方、置換型  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/ $n$ -MoS<sub>2</sub> TFET としては、 $n$ -MoS<sub>2</sub>(1~3 層)において、ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及び  $h$ -BN TG で作製したデバイスの特性比較を行った。

### 4. 研究成果

#### ○PtS<sub>2</sub>, SnSe<sub>2</sub> におけるキャリア数の定量評価

PtS<sub>2</sub>, SnSe<sub>2</sub> のホール素子を作製した。その後、磁場による横抵抗  $R_{xy}$  の変調を観測し、 $dR_{xy}/dB = 1/qtn$  からキャリア密度  $n$  を決定した。 $n$  の温度依存性は Fig. 1 のようになり、PtS<sub>2</sub> と SnSe<sub>2</sub> に明確な違いが表れた。PtS<sub>2</sub> の  $n$  は 300 K で  $\sim 3.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  と求められ、これは MoS<sub>2</sub> とほぼ同じ値であり先行研究からの予想に反し低ドープ濃度であることが明らかになった。温度依存性から活性化エネルギー  $E_A$  は 98.8 meV と求められ、これはドナー準位の価電子帯からの深さを表していると考えられる。 $n$  と  $E_A$  からドナー密度  $N_D$  は  $\sim 7.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  と計算された。これら PtS<sub>2</sub> の  $n$  やその温度依存性、ドナー準位は本研究によって初めて明らかになった。一方の SnSe<sub>2</sub> では  $n$  に温度依存性が無く、300 K で  $n \approx N_D$  は  $\sim 4.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $E_A$  は 0.4 meV とドナー準位がかなり浅い所にあることが分かった。

Fig. 2 はホール測定によって決められた  $n$  を用いて求めたホール移動度  $\mu_H$  の温度依存性である。 $\mu_H$  は SnSe<sub>2</sub> に比べて PtS<sub>2</sub> の方が大きく、これはドナー密度が高いほど不純物散乱が起こりやすいことを考慮すると、 $N_D$  の測定結果とよく一致している。また、PtS<sub>2</sub>, SnSe<sub>2</sub> のいずれも 300 K から温度低下に伴って  $\mu_H$  の増加が見られる。この実験結果は先述の  $I_b$ - $V_G$  特性で議論したフォノン散乱の抑制を支持するものとなっている。

2D 半導体は層数によって  $E_G$  が変わる材料が多く、PtS<sub>2</sub> や SnSe<sub>2</sub> も単層からバルクにかけてそれぞれ 1.8 - 0.5 eV, 1.7 - 1.1 eV と大きく変化する。そこで  $E_G$  を考慮に入れて  $N_D$  と  $W_{Dm}$  の関係をプロットしたものが Fig. 3 になる。図中の PtS<sub>2</sub> と SnSe<sub>2</sub> の  $N_D$  は本研究のホール測定で得られた値を用いている。PtS<sub>2</sub> の  $W_{Dm}$  を 10-30 nm と実験結果から概算すると  $E_G$  は 0.13-0.69 eV 程であることが図から読み取れる。図より  $E_G > 0.75 \text{ eV}$  程であれば  $N_D$ - $W_{Dm}$  関係はほぼ同じ曲線に乗るが、狭ギャップの半導体においては  $N_D$ - $W_{Dm}$  関係が大きく  $E_G$  に依存することが分かる。

**結論:** 2D- $n$  結晶の候補である PtS<sub>2</sub> と SnSe<sub>2</sub> に対してホール測定を行い、キャリア密度や移動度、その温度依存性を実験的に決定し、電流特性やドナー準位に対する考察を得た。近年注目を浴びている PtS<sub>2</sub> の基礎的な電気物性に対し実験による裏付けを与えた一方、 $P$ 型 2D-TFET のソースとして SnSe<sub>2</sub> の優位性を明らかにした。

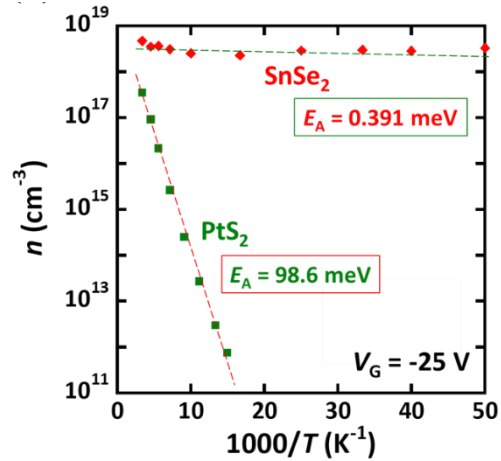


Fig. 1 PtS<sub>2</sub>, SnSe<sub>2</sub> におけるキャリア密度の温度依存性.

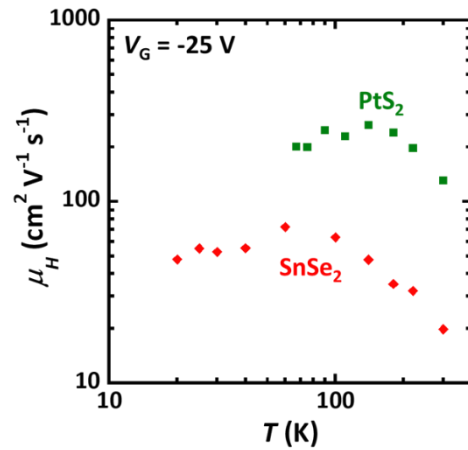


Fig. 2 PtS<sub>2</sub>, SnSe<sub>2</sub> におけるホール移動度の温度依存性.

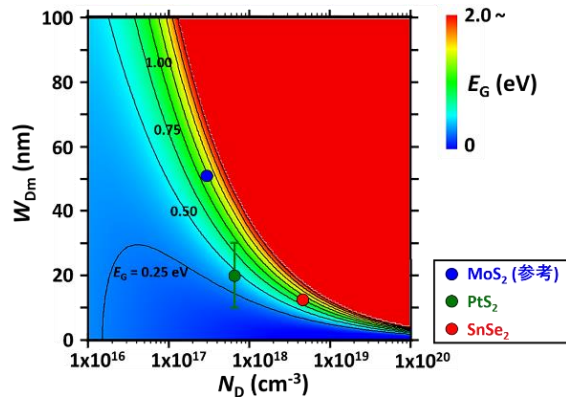


Fig. 3 2D 材料におけるドナー密度, バンドギャップ, 最大空乏層幅の関係.

### ○置換型 $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> TFET

ソースとして Nb 置換型  $p^+$ -MoS<sub>2</sub> を選択した  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> TFET について特性を評価した. Fig. 4 に  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/1L-MoS<sub>2</sub> ヘテロ構造のダイオード特性を示す.  $p^+$ -MoS<sub>2</sub> は完全縮退しているため, 単層 MoS<sub>2</sub> をチャンネルに用いた場合でも TG による変調の影響を受けず type III が得られる. Fig. 5 に  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> TFET の  $V_S = -2$  V,  $V_D = 0$  V (ダイオードにおける逆バイアス -2V) における 300 K での  $I_{DS} - V_{TG}$  特性を示す. 完全縮退  $p^+$ -MoS<sub>2</sub> ソースにおいて, type III のバンドアライメントが安定して得られることにより, 3 種類のデバイス全てで 1  $\mu$ A 程度の大きなオン電流を得た.

Fig. 6 に  $S.S.$  の  $I_{DS}$  依存性を示す.  $I_{DS}$  増加に伴う  $S.S.$  の増加から TFET 動作が確認できる. ここで, 単層-MoS<sub>2</sub> チャンネルで比較した場合, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TG から BN-TG に変更することで  $S.S.$  は最低値で 250 mV/dec 程度から 150 mV/dec 程度に低減した.  $h$ -BN は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に比べて誘電率が小さいためゲート容量は  $h$ -BN の方が小さいにも関わらず  $S.S.$  が低減したのは界面準位が大きく低減できたためと考えられる. さらに  $S.S.$  を広い電流範囲で小さくするためには, チャンネルのバンドギャップを小さくしトンネル確率を上げることが有効である. チャンネルをバンドギャップの小さい 3 層に変えた 3 層-MoS<sub>2</sub>/BN-TG デバイスでは, 広い電流範囲で  $S.S.$  がさらに低減しており, 最小で 51 mV/dec と 60 mV/dec 以下の  $S.S.$  を得ることができた. リーク電流存在時においては  $S.S.$  は見かけ上小さくなるため, 精緻なリーク電流計測から測定限界に到達していること,  $I_S$  と  $I_D$  が常に一致していることを確認している.

**結論:**  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> ヘテロ構造において, 2 次元系の特徴である 2 次元界面での極低界面準位及びバンドギャップの層数依存性を最適化することで 60 mV/dec 以下の  $S.S.$  を達成した.

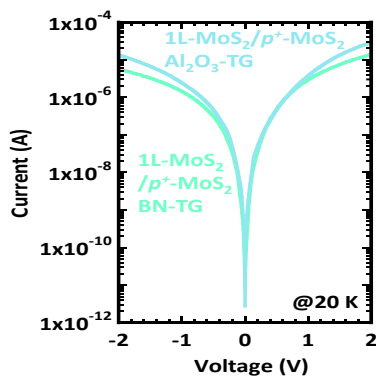


Fig. 4  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/1L-MoS<sub>2</sub> のダイオード特性.

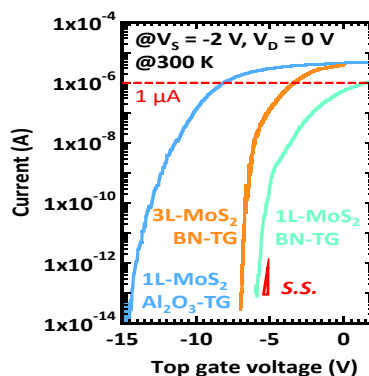


Fig. 5  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> の  $I_{DS} - V_{TG}$  特性.

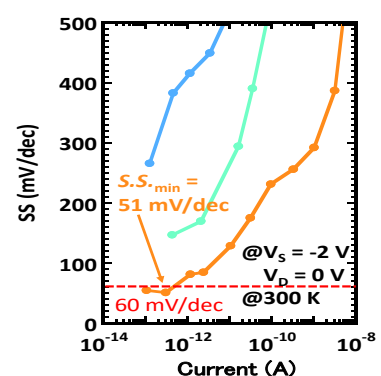


Fig. 6  $p^+$ -MoS<sub>2</sub>/n-MoS<sub>2</sub> における  $S.S.$  の  $I_{DS}$  依存性.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fang Nan, Nagashio Kosuke	4. 巻 7
2. 論文標題 Quantum-mechanical effect in atomically thin MoS <sub>2</sub> FET	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 014001 ~ 014001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/ab42c0	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 Maruyama Mina, Nagashio Kosuke, Okada Susumu	4. 巻 2
2. 論文標題 Influence of Interlayer Stacking on Gate-Induced Carrier Accumulation in Bilayer MoS <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1352 ~ 1357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00139	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 Higashitarumizu Naoki, Kawamoto Hayami, Lee Chien-Ju, Lin Bo-Han, Chu Fu-Hsien, Yonemori Itsuki, Nishimura Tomonori, Wakabayashi Katsunori, Chang Wen-Hao, Nagashio Kosuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Purely in-plane ferroelectricity in monolayer SnS at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16291-9	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 Sols-Fernandez Pablo, Terao Yuri, Kawahara Kenji, Nishiyama Wataru, Uwanno Teerayut, Lin Yung-Chang, Yamamoto Keisuke, Nakashima Hiroshi, Nagashio Kosuke, Hibino Hiroki, Suenaga Kazu, Ago Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Isothermal Growth and Stacking Evolution in Highly Uniform Bernal-Stacked Bilayer Graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 6834 ~ 6844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.0c00645	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 Fang N., Otsuka K., Ishii A., Taniguchi T., Watanabe K., Nagashio K., Kato Y. K.	4. 巻 7
2. 論文標題 Hexagonal Boron Nitride As an Ideal Substrate for Carbon Nanotube Photonics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1773 ~ 1779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c00406	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 Nagashio Kosuke	4. 巻 35
2. 論文標題 Understanding interface properties in 2D heterostructure FETs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 103003 ~ 103003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6641/aba287	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 Sasaki Taro, Ueno Keiji, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nishimura Tomonori, Nagashio Kosuke	4. 巻 16
2. 論文標題 Understanding the Memory Window Overestimation of 2D Materials Based Floating Gate Type Memory Devices by Measuring Floating Gate Voltage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2004907 ~ 2004907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202004907	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 Nakamura Keigo, Nagamura Naoka, Ueno Keiji, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nagashio Kosuke	4. 巻 12
2. 論文標題 All 2D Heterostructure Tunnel Field-Effect Transistors: Impact of Band Alignment and Heterointerface Quality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 51598 ~ 51606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaami.0c13233	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 Maruyama Mina, Nagashio Kosuke, Okada Susumu	4. 巻 14
2. 論文標題 Carrier Distribution Control in van der Waals Heterostructures of MoS2 and WS2 by Field-Induced Band-Edge Engineering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.044028	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 Kawamoto H., Higashitarumizu N., Nagamura N., Nakamura M., Shimamura K., Ohashi N., Nagashio K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Micrometer-scale monolayer SnS growth by physical vapor deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 23274 ~ 23281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0nr06022d	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 Li Weisheng, Zhou Jian, Cai Songhua, Yu Zhihao, Zhang Jialin, Fang Nan, Li Taotao, Wu Yun, Chen Tangsheng, Xie Xiaoyu, Ma Haibo, Yan Ke, Dai Ningxuan, Wu Xiangjin, Zhao Huijuan, Wang Zixuan, He Daowei, Pan Lijia, Shi Yi, Wang Peng, Chen Wei, Nagashio Kosuke, Duan Xiangfeng, Wang Xinran	4. 巻 2
2. 論文標題 Uniform and ultrathin high- gate dielectrics for two-dimensional electronic devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Electronics	6. 最初と最後の頁 563 ~ 571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41928-019-0334-y	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 該当する

1. 著者名 Fang Nan, Toyoda Satoshi, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nagashio Kosuke	4. 巻 29
2. 論文標題 Full Energy Spectra of Interface State Densities for n and p type MoS2 Field Effect Transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1904465 ~ 1904465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201904465	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 Nagamura Naoka, Fukidome Hirokazu, Nagashio Kosuke, Horiba Koji, Ide Takayuki, Funakubo Kazutoshi, Tashima Keiichiro, Toriumi Akira, Suemitsu Maki, Horn Karsten, Oshima Masaharu	4. 巻 152
2. 論文標題 Influence of interface dipole layers on the performance of graphene field effect transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 680 ~ 687
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.06.038	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 該当する

1. 著者名 Asakura Eito, Suzuki Masaki, Karube Shutaro, Nitta Junsaku, Nagashio Kosuke, Kohda Makoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Detection of both optical polarization and coherence transfers to excitonic valley states in CVD-grown monolayer MoS2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063005 ~ 063005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab21a8	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 Toyoda Satoshi, Uwanno Teerayut, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nagashio Kosuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Pinpoint pick-up and bubble-free assembly of 2D materials using PDMS/PMMA polymers with lens shapes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 055008 ~ 055008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab176b	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 Matsuoka Ryota, Toyoda Ryojun, Shiotsuki Ryo, Fukui Naoya, Wada Keisuke, Maeda Hiroaki, Sakamoto Ryota, Sasaki Sono, Masunaga Hiroyasu, Nagashio Kosuke, Nishihara Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Expansion of the Graphdiyne Family: A Triphenylene-Cored Analogue	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 2730 ~ 2733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.8b00743	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45件(うち招待講演 13件/うち国際学会 27件)

1. 発表者名 K. Nagashio,
2. 発表標題 "Interface engineering for 2D layered semiconductors",
3. 学会等名 2020 Virtual MRS Spring/Fall meeting, (Nov./Dec. 2020, online, USA). (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長汐晃輔,
2. 発表標題 "2次元電子デバイス",
3. 学会等名 応用物理学会東海支部55周年記念講演, 東海ニューフロンティアリサーチワークショップ, (2020年12月-1月, online on-demand). (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nagashio,
2. 発表標題 "In-plane ferroelectricity in monolayer SnS",
3. 学会等名 6th international Workshop on 2D Materials 2020, supported by A3 Foresight Program, (Sep. 24-25, 2030, Online). (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長汐晃輔,
2. 発表標題 "2次元材料の電子デバイス応用",
3. 学会等名 FNTG学会リレーウェビナー, (2020年6月30日, zoom webinar). (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Higashitarumizu, H. Kawamoto, C.-J. Lee, B.-H. Lin, F.-H. Chu, I. Yonemori, T. Nishimura, K. Wakabayashi, W.-H. Chang, K. Nagashio, t.
2. 発表標題 "Experimental Demonstration of In-Plane Ferroelectricity in SnS Down to Monolayer",
3. 学会等名 2020 Virtual MRS Spring/Fall meeting, (Nov./Dec. 2020, online, USA). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nakamura, N. Nagamura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 "The demonstration of SS below 60 mV/dec at RT in all 2D heterostructure TFET",
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 30, 2020, All-VIRTUAL conference). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Sasaki, Keiji Ueno, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Tomonori Nishimura, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 "Understanding the Tunneling Behavior in 2D Based Floating Gate Type Memory Device by Measuring Floating Gate Voltage",
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 30, 2020, All-VIRTUAL conference). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichiro Sato, Keiji Ueno, Tomonori Nishimura, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 "Carrier Density of Apparently Degenerated PtS <sub>2</sub> Determined by Hall Measurement",
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 29, 2020, All-VIRTUAL conference). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yih-Ren Chang, Naoki Higashitarumizu, Hayami Kawamoto, Fu-Hsien Chu, Chien-Ju Lee, Tomonori Nishimura, Wen-Hao Chang, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 "Screw dislocation driven spiral growth in SnS initiated by atomic graphene steps",
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 28, 2020, All-VIRTUAL conference). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, and K. Nagashio,
2. 発表標題 "Understanding the device operation of ambipolar channel based 2D memory devices by trajectory of floating gate voltage",
3. 学会等名 78th Device Research Conference, (June 23, 2020, Online). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 太郎, 上野 啓司, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 西村 知紀, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 浮遊ゲート電位 (VFG) のトラジェクトリを用いた2Dメモリデバイスの動作理解,
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会, (2020年9月11日, オンライン開催).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 圭吾, 永村 直佳, 上野 啓司, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 完全2次元ヘテロTFETによる室温での60mV/dec以下のSS実現,
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会, (2020年9月11日, オンライン開催).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 太郎, 上野 啓司, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 西村 知紀, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 浮遊ゲート電位の測定による2DメモリデバイスのMemory window過大評価の理解,
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会, (2020年9月11日, オンライン開催).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 YihRen Chang, Naoki Higashitarumizu, Hayami Kawamoto, Tomonori Nishimura, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 Atomic step induced spiral growth in PVD SnS,
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会, (2020年9月10日, オンライン開催).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山 航, Solis-Fernandez Pablo, 寺尾 友里, 河原 憲治, 吾郷 浩樹, 西村 知紀, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 CVD-2層グラフェンのh-BNヘテロFET動作解析による結晶性評価,
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会, (2020年9月9日, オンライン開催).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村 知紀, 小島 俊哉, 長汐 晃輔, 丹羽 正昭,
2. 発表標題 "YSZ極薄膜の高温インピーダンス解析",
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会, (2020年3月15日, 上智大学(東京都千代田区)).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 YihRen Chang, Hayami Kawamoto, Naoki Higashitarumizu, Tomonori Nishimura, Kosuke Nagashio,
2. 発表標題 "PVD growth of AA stacking SnS through screw dislocation induced by substrate edge steps",
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会, (2020年3月15日, 上智大学 (東京都千代田区))
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 圭吾, 永村 直佳, 上野 啓司, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "p+-MoS2/n-MoS2 2D-TFETにおける60 mV/dec以下のS.S.実現",
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会, (2020年3月13日, 上智大学 (東京都千代田区)).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東垂水 直樹, 川元 颯巳, 梅田 雅也, 北浦 良, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "層状マイカ基板上の 2 次元ピエゾ材料を用いたナノ発電素子",
3. 学会等名 [講演奨励賞受賞記念講演] 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会, (2020年3月12日, 上智大学 (東京都千代田区)).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 太郎, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 西村 知紀, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "浮遊ゲート電位の測定による2Dメモリデバイス動作の理解",
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会, (2020年3月12日, 上智大学 (東京都千代田区)).
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Nagashio,
2 . 発表標題 "Understanding interface properties in 2D heterostructure FETs"
3 . 学会等名 2019 Int. Workshop on Dielectric thin films for future electron devices -science and technology -, (Nov. 19, 2019, Tokyo Tech. Tokyo, Japan) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagashio,
2 . 発表標題 "Full energy spectra of interface states density for n- and p-type MoS2 field effect transistors"
3 . 学会等名 Recent Progress in Graphene Research(RPGR), (October10, 2019, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane, Japan). (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagashio,
2 . 発表標題 "2D heterostructure FETs",
3 . 学会等名 PKU-UTokyo Nanocarbon summer camp, (Aug. 2, 2019, UTokyo, Tokyo). (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagashio,
2 . 発表標題 "2D layered semiconductors",
3 . 学会等名 7th International symposium on organic and inorganic electronic materials and related nanotechnology, (June 19-22, 2019, Shinshu Univ. Nagano, Japan). (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashio,
2. 発表標題 "How to understand interface properties in 2D heterostructure FETs",
3. 学会等名 2019 Symposia on VLSI Technology and Circuits, (June 19-14, 2019, RIHGA Royal Hotel, Kyoto, Japan). (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "2次元層状トランジスタの界面の理解と制御",
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, (2019年10月7日, 機械振興会館 (東京)). (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "2次元層状SnSの圧電・強誘電特性",
3. 学会等名 第23回VBLシンポジウム, (2019年10月6日, 名古屋大学 (愛知)). (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashio, K. Taniguchi, and N. Fang,
2. 発表標題 "Direct observation of electron capture & emission processes by the time domain charge pumping measurement of MoS <sub>2</sub> FET",
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019, (Dec. 13, 2019, Yokohama Symposia, Yokohama). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Uwanno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio,
2. 発表標題 "Photoresponse in h-BN encapsulated bilayer graphene field-effect phototransistor",
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019, (Dec. 13, 2019, Yokohama Symposia, Yokohama (国際学会))
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashio,
2. 発表標題 "Ferroelectricity in monolayer SnS",
3. 学会等名 JSPS/EPSCRC C2C meeting, (Nov. 22, 2019, Tohoku univ., Sendai) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Higashitarumizu,
2. 発表標題 "All-2D Flexible Device with Piezoelectric Layered Materials for Highly Sensitive Sensor and Generator Applications",
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene Research(RPGR), (October8, 2019, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane, Japan). (Oral) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sasaki,
2. 発表標題 "High Temperature Retention Study of MoS2/h-BN/MoS2 Hetero-Stack Based Non-Volatile Memory",
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene Research(RPGR), (October9, 2019, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane, Japan). (Poster) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1 . 発表者名 H. Kawamoto,
2 . 発表標題 "Growth and Characterization of High Quality Monolayer SnS",
3 . 学会等名 Recent Progress in Graphene Research(RPGR), (October7, 2019, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane, Japan). (Poster) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nakamura,
2 . 発表標題 "Selection Mechanism of Band Alignment in 2D p+/n Tunnel FET",
3 . 学会等名 Recent Progress in Graphene Research(RPGR), (October8, 2019, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane, Japan). (Oral) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Higashitarumizu, H. Kawamoto, K. Nagashio,
2 . 発表標題 "Demonstration of Electromechanical Device Based on 2D Piezoelectric Materials for Nanogenerator Applications",
3 . 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 5, 2019, Nagoya University, Nagoya). (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Sasaki, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio,
2 . 発表標題 "388 K High Temperature Retention Study of 2D Hetero-stack Based Non- Volatile Memory",
3 . 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 5, 2019, Nagoya University, Nagoya). (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nakamura, N. Nagamura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio,
2 . 発表標題 "Band Alignment in Charge- Transfer-Type p+-WSe <sub>2</sub> /MoS <sub>2</sub> Tunnel FET",
3 . 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 4, 2019, Nagoya University, Nagoya). ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Kawamoto, N. Higashitarumizu, M. Nakamura, I. Yonemori, K. Wakabayashi, K. Nagashio,
2 . 発表標題 "PVD growth of monolayer SnS under S-rich condition toward piezoelectric application",
3 . 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 4, 2019, Nagoya University, Nagoya). ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagashio,
2 . 発表標題 "All solid-state 2D tunnel FET",
3 . 学会等名 Compound semiconductor week 2019 (CSW2019), (May 19-23, 2019, Kasugano International Forum, Nara, Japan). ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Higashitarumizu, H. Kawamoto, K. Nagashio,
2 . 発表標題 "Electromechanical Response of Few-to-monolayer SnS PVD-grown on Flexible Mica",
3 . 学会等名 2019 MRS Spring Meeting, (April, 26, 2019, Phoenix Convention Center, Phoenix, USA). ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Uwanno, T. Taniguchi, K. Watanabe, & K. Nagashio,
2. 発表標題 "Photoresponse in h-BN encapsulated bilayer graphene field-effect phototransistor",
3. 学会等名 2019 MRS Spring Meeting, (April, 26, 2019, Phoenix Convention Center, Phoenix, USA). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東垂水 直樹, 川元 颯巳, 西村 知紀, 張 文豪, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "2次元層状SnSの室温強誘電特性",
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会, (2019年9月19日, 北海道大学(札幌市)).
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東垂水 直樹, 川元 颯巳, 梅田 雅也, 北浦 良, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "中心対称性の破れた2次元層状物質の圧電特性",
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会, (2019年9月19日, 北海道大学(札幌市)).
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 太郎, 谷口 尚, 渡邊 賢司, 西村 知紀, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "MoS <sub>2</sub> /h-BN/Graphite積層構造による不揮発性メモリデバイスの動作解析",
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会, (2019年9月20日, 北海道大学(札幌市)).
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 雄一郎, 中村 圭吾, 上野 啓司, 長汐 晃輔,
2. 発表標題 "PtS <sub>2</sub> /WSe <sub>2</sub> によるp型2D-TFETにおけるBTBT電流の観測",
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会, (2019年9月19日, 北海道大学(札幌市)).
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 長汐晃輔,	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス, 東京, 2020, pp. 33-41, ISBN:9784860436636	5. 総ページ数 9
3. 書名 "完全二次元層状ヘテロ2層グラフェントランジスタ", グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用,	

1. 著者名 長汐晃輔,	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス, 東京, 2020, pp. 183-191. ISBN:9784860436636	5. 総ページ数 9
3. 書名 "MoS <sub>2</sub> FETにおけるゲート容量の理解", グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用,	

1. 著者名 長汐晃輔,	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス, 東京, 2020, pp. 251-260.	5. 総ページ数 10
3. 書名 "2次元層状トンネルFET", ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線,	

1. 著者名 長汐晃輔,	4. 発行年 2020年
2. 出版社 応用物理, 2020, 89, 139-146.	5. 総ページ数 8
3. 書名 "2次元層状ヘテロFETにおける界面特性制御",	

1. 著者名 服部吉晃, 長汐晃輔,	4. 発行年 2019年
2. 出版社 NEW DIAMOND, 2019, 35	5. 総ページ数 5
3. 書名 " hBNの絶縁性破壊強さの異方性とその起源 "	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東大マテリアル・長汐研  <a href="http://webpark1753.sakura.ne.jp/nagashio_lab/">http://webpark1753.sakura.ne.jp/nagashio_lab/</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
研究分担者	吾郷 浩樹  (Ago Hiroki)  (10356355)	九州大学・グローバルイノベーションセンター・教授    (17102)	

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			
台湾	National Chiao Tung University			