

平成 30 年 4 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25107004

研究課題名(和文)複合原子層の界面特性理解と原子層デバイスへの応用

研究課題名(英文)Understanding and device application of the hetero-atomic layers

研究代表者

長汐 晃輔(NAGASHIO, Kosuke)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：20373441

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 161,100,000円

研究成果の概要(和文):新学術領域研究「原子層科学」において、2次元層状半導体の輸送特性、及び複層化技術の確立、複層化したデバイスの特性評価を行い、最終的にOLEDへの応用展開を進めた。既存のヘテロエピと異なり、格子定数差とは無関係に複層化が可能であり、その界面は電氣的に不活性であることがわかった。今後のさらなる展開が期待できる。

研究成果の概要(英文):In the research of atomic layers for Scientific Research on Innovative Areas, (1) the transport properties of 2 dimensional layered semiconductors, (2) fabrication technique for the layered heterostructure, and its transport properties and (3) application to the OLED were studied. Compared with the conventional heteroepitaxy, layered heterostructure can be fabricated without considering the lattice mismatch. The layered heterointerface is proved to be electrically inert. Further development can be expected.

研究分野: 2 dimensional materials

キーワード: グラフェン 2次元材料 輸送特性

1. 研究開始当初の背景

新学術領域研究「原子層科学」が開始した2013年当初は、殆どが層状グラファイトから単層を取り出したグラフェンを主要な研究対象としたものであった。当時を振り返りながら研究背景を述べる。2010年に、h-BN単結晶上でグラフェンデバイスを作成することで60,000 cm²/Vs程度の高いキャリア移動度が報告され、グラフェンの潜在的に高いポテンシャルを引き出すには、周環境からの影響(散乱源、ポテンシャル揺らぎ等)を低減させることが重要であるという認識が広まりつつあった状況であった。そのような状況において、原子層膜グラフェンの輸送特性の向上に対しては、層間の相互作用の低減という観点で絶縁性原子層膜との複層化が最適という考えが浸透していく段階であった。

また、当時グラフェン以外にintrinsicにギャップを持つMoS₂のトランジスタが報告された時期であった。図1に多様な原子層膜の種類を示すが、ギャップの無いグラフェンから半導体としてのMoS₂、絶縁体としてのh-BNまで非常に多様性があることが認識されてきたのも新学術研究開始当初の状況であった。これらの原子層膜の複層化により幅広い新たな展開をきり開けるとの期待、特に、1 nm以下の絶縁性原子層膜を利用したトンネル電流を積極的に利用したデバイス構造等、応用面にも展開が期待できた。このような複層化はカーボンナノチューブ研究においては議論されておらず、グラフェンの2次元形状に端を発した新しい概念であった。このような研究状況が「原子層科学」発足当時の状況である。

組み合わせにより幅広い展開へ

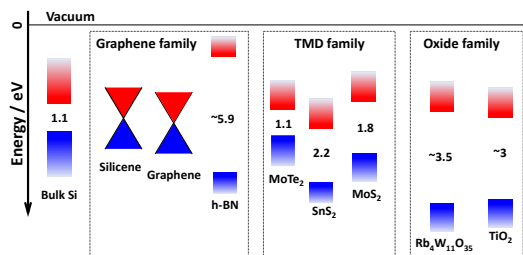


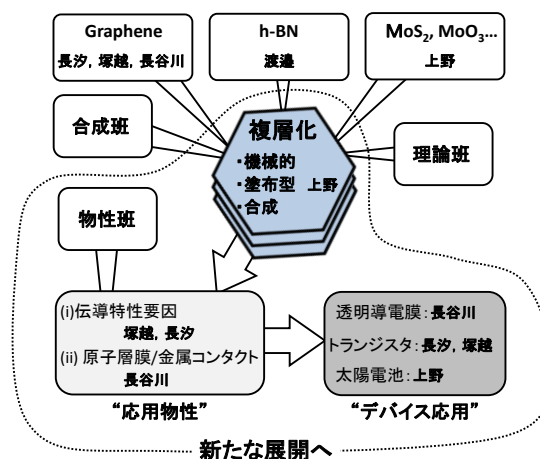
図1 原子層膜の種類とバンド構造.

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、新学術領域「原子層科学」における応用班では、原子層膜を複層化した際の相互作用を理解し、透明導電膜やトランジスタ応用に展開していくことを目的とした。

以下の図に研究方針をまとめた。これまで、様々な種類の原子層膜(グラフェン、h-BN、MoS₂等)を個々の独自技術・独自装置を駆使し研究していたが、原子層科学の枠組みにより技術を持ち寄り複層化し新たな展開を創造していく。他班との連携も強くして、困難を極めていく次世代ナノエレクトロニクス

開発のためのナノマテリアル材料開拓のフロンティアとしての研究を進めた。



3. 研究の方法

以下のような大枠で研究を進めた。応用物性として、デバイス応用を意識した点に着目し、特性評価を行った。

A. 2次元結晶育成及びh-BNの結晶性向上

結晶中心に観測されるCが濃縮されたコア領域に対する理解とさらなる高品質化。

B. 2次元層状半導体の輸送特性評価

層状物質の最も重要な特徴である層数依存性に着目し、輸送特性の総合的理解を目指す。

C. 複層化技術の確立と輸送特性評価

原子層膜の複層化をドライ環境における機械的剥離法による複層化。その複層化デバイスの輸送特性評価。

D. 透明導電膜の応用展開

グラフェンの透明導電膜、特にOLEDの透明導電膜としての利用を進める。

4. 研究成果

A1. h-BN高純度単結晶の結晶性の向上

応用を目指したh-BN単結晶膜成長の報告が数多くなされているが、紫外発光機構の解明のためにさらに高品質の単結晶が望まれる。本報告では、高品質h-BNの育成と、大面積化を目指した成長モード条件探索のために、高圧法により得られた単結晶を基板した熱CVD法によるホモエピタキシャル成長を試みた。高圧法により得たh-BN薄片を剥離転写法によりc面サファイア基板上に置き、ホモエピタキシャル基板とした。ジボランおよびアンモニアを原料ガスに用い、基板温度1300℃で1時間程度で膜厚0.5 μmの薄膜が得られた(図2左)。ホモエピタキシャル膜の成長評価として顕微ラマン散乱分光法による深さ方向のE_{2g}モードスペクトル幅マッピングを試みた。ホモエピタキシャル層の深さ方向の顕微ラマンによるE_{2g}マッピングデータは基板表面0.5 μmに位置するエピタキシャル膜近傍で半値幅の急激な減少を見せたことから(図2右)、ホモエピタキシャル膜は高圧合成より

もさらに高い結晶性を有していることがわかった。

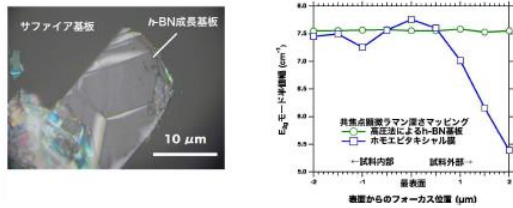


図2 ホモエピタキシャル成長膜の写真。とラマンモードスペクトル幅の深さ方向のマッピング。

A2.TMDCのバルク結晶の合成

TMDCのうち、MoS₂の天然鉱物には10 cmを超えるような大型の単結晶も存在するが、天然物である以上さまざまな不純物が含まれている可能性がある。一方、人工単結晶であればより純粋な試料形成が可能であり、さらに不純物をその種類、量を制御して添加することもできる。また他のTMDCはそもそも天然結晶が産出しないので、人工単結晶合成が必要である。TMDCは融点が高く、通常圧力では高温では分解し融液が得にくいいため、単結晶成長には蒸気輸送法が主に用いられている。蒸気輸送法では、アンフル内に原料物質を真空封入し、図3に示すような管状炉を用いて左右に温度勾配を与えて昇温し、ほとんどの場合高温側(T_H)から低温側(T_L)に原料を徐々に輸送して析出させ、単結晶を生成させる。TMDCの単結晶成長では、主にハロゲン(Cl₂, Br₂, I₂)を輸送剤として加えた化学蒸気輸送法(chemical vapor transport: CVT)が用いられている。例えば組成式MX₂のTMDCでI₂を添加した場合には、

$$MX_2(s) + 2I_2(g) \rightleftharpoons MI_4(g) + X_2(g)$$
 の平衡状態となり、低温側で単結晶MX₂が徐々に成長する。

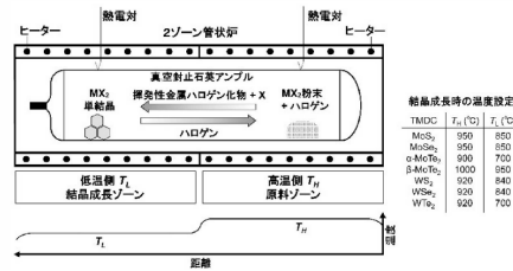


図3 化学蒸気輸送法用管状炉の模式図。

B. 2次元層状半導体の輸送特性評価

原子膜スケールの厚さの導電膜に電極を形成し、ゲート絶縁膜を介して電界を印加すると薄膜抵抗ならびに金属と薄膜界面の端子抵抗が変化する。天然MoS₂から剥離法で作った原子膜で電界効果トランジスタを作製し、導電性の評価を行った。伝導チャンネルの抵抗率から導出した移動度を考察する。移動度は、単層では10 cm²/Vs程度であり、層が増えるにつれて増大する。原子膜の散乱要因を、モデル計算によって分離し、強度を比較した(図4)。このモデル計算では、既に確立してい

る電界効果トランジスタ、超格子、グラフェン単層膜モデルをベースとした。薄膜上層を空気の絶縁層として、上下の絶縁領域に挟まれた導電膜中の電荷に対して、膜中膜外からの散乱要因ならびに分極効果に関して鏡像効果を考慮し、フォノン効果も取り入れた。上述の前提にて、ゲート絶縁膜/伝導チャンネル/絶縁層系でのチャンネル内の導電電荷へのクーロン力に因る散乱効果(導電チャンネル下側からの効果:CI_{bot}, 上側からの効果:CI_{top})、音響フォノン(ADP)と光学フォノン(ODP), 分極効果(Frohlich 散乱)の強度比を比較した(図4)。層数が薄い場合の主散乱は導電チャンネル下からのクーロン散乱である。1層の場合は、基板上側からの散乱も大きく効くが、原子膜数が増えるに従って、急激に散乱レートが減少する。これは、チャンネル下側からゲート電圧を印加して伝導電荷の分布をゲート絶縁膜側に偏らせるからである。また、分極効果による影響は、ゲート絶縁膜/伝導チャンネル/絶縁層の構造からは避けられない要因である。音響フォノンと光学フォノンは、他の散乱要因に対して一桁小さい。結果として、チャンネル内の導電電荷へのクーロン力に因る散乱効果と分極効果によって、導電性が決まることがわかった。

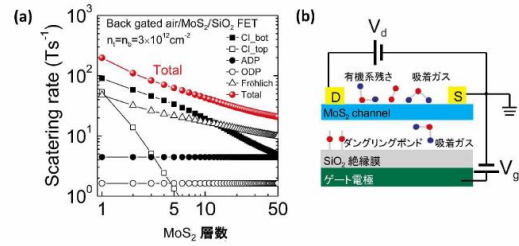


図4 実験結果の導電性をモデル計算にて分離した散乱要因別の原子膜層数依存性。

C. 複層化技術の確立と輸送特性評価

Siにおける短チャンネル効果を克服するための新しいチャンネル材料として原子層厚さの2層グラフェンの潜在的な高い可能性を界面の理解に基づき最大限引き出すことを試みた。外部電界印加により2層グラフェンは0.3 eV程度のギャップが形成されることが理論的に示唆されているが、“いわゆる”ギャップ内準位(D_i)が存在し、その準位をキャリアが最近接ホッピング伝導するため室温でI_{on/off}が低いことが問題であった。そこで、h-BNとの複層化により、ダングリングボンドのない2次元ヘテロ界面形成を行った。まず、20 μm程度のへき開2次元単結晶を複層化する装置を立ち上げ、転写技術を確立した。層状絶縁体のh-BNとグラファイトをバックゲート電極として用いることで(図5右)、SiO₂上の荷電不純物を完全にスクリーニングすることができ、バンドギャップの空間的ばらつきを低減することが可能になる。しかしながら、トップゲートの金属電極は微結

晶化し、仕事関数の面方位依存性として上部からの空間的なポテンシャル分布を与えることが電子線後方散乱回折法による解析結果からわかった。そこで、最終的にゲートスタックすべてを2次元層状物質で構成することで、ポテンシャル揺らぎを低減し、電流のon/off比を 5×10^5 まで向上させることに成功した。さらに解析の結果、*h*-BN/グラファイトで複層化した場合、ポテンシャルの揺らぎは ~ 1 meV程度にまで低減できることが分かった。また、このような系においては、容量の周波数依存性は観測されず清浄界面を達成できていることが理解できる。単一デバイスにおいては、 ~ 100 meV程度の空間的に均一なギャップ形成が可能であることを実証した。

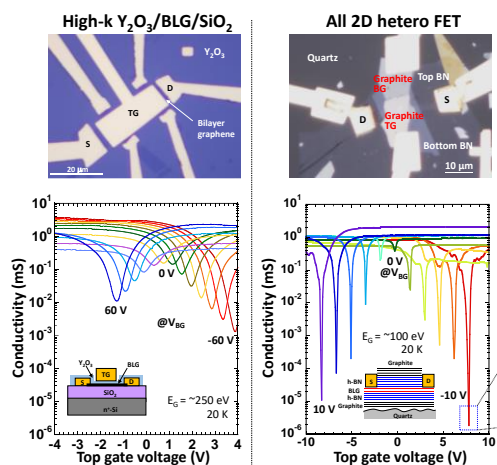


図5 high-kと完全2Dヘテロの比較。

D. 透明導電膜の応用展開

グラフェン透明電極の導電性を改善するため、化学ドーピングが広く行われている。例えば、 HNO_3 や AuCl_3 が使われているが、薬品が高価で取り扱いに安全対策が必要、安定性がないなど欠点も多い。そこで化学薬品では無くUVオゾンクリーナーにより酸素雰囲気中でグラフェンに紫外光を照射後、有機導電性インクTC-07でコーティングした。本手法により、大気中で低抵抗状態を長期間維持できることを発見し、有機ELの透明電極として応用できることを初めて示した。UVオゾン処理では、酸化力の強いオゾンや活性酸素によりグラフェンが酸化され、通常導電性が失われるが、照射条件により光ドーピング効果が起こり、抵抗が下がると考えられる。作製したデバイスの構造を図6(a)に示す。3 mm × 30 mmの短冊状の発光面を6個並べて発光させた。以上の結果によって、グラフェンシートの光ドーピング状態を安定化した基板が有機EL素子の透明電極として応用できることを示した。今回の素子では、図6(b)に示したような電極構造を用いている。上部には正電圧を印加する陽極コンタクトを設けたが、それだけでは図の下側の陰極に向かって電圧降下が生じる。透明電極の導電性が不足していると、電圧降

下が大きくなって輝度の低下が生じてしまう。そこで、細く下に伸びる補助電極を設けることで導電性の不足を補った。その結果、発光強度は均一に近づいたが、補助電極からアルミの陰電極に発光に寄与しない面内電流が流れてしまい電流効率が悪化した(約1.8 cd/A)。課題としては、補助電極には極力頼らず、光ドーピングの手法などを駆使して透明電極のシート抵抗を下げることにより電圧降下を低減させ、輝度の均一化とより大きなデバイスに対応できるようにすることである。また、グラフェンのデバイス応用として透明電極をパターンニングすることで面内電流は低減させ、さらなる電流効率向上が期待できる。

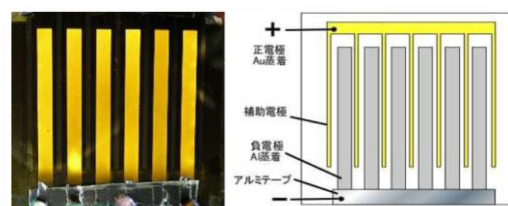


図6 EL素子の発光面及び電極構造。

最後に、新学術「原子層科学」として共同研究を推進し、個々の研究室が持つ有益な情報を共有する仕組みとして結晶成長講演会(上野 2014/8)、原子層複層化講習会を企画した(長汐 2015/10 及び 2016/10)。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文, 以下抜粋] (計 87 件)

[25] Y.-M. Chang, S.-H. Yang, C.-Y. Lin, C.-H. Chen, C.-H. Lien, W.-B. Jian, K. Ueno, Y.-W. Suen, K. Tsukagoshi, and Y.-F. Lin, "Reversible and Precisely Controllable p/n-Type Doping of MoTe₂ Transistors through Electrothermal Doping", *Adv. Mater.*, 30, 1706995 (2018).

[24] Y. Hattori, T. Taniguchi, K. Watanabe, and K. Nagashio, "Determination of Carrier Polarity in Fowler-Nordheim Tunneling and Evidence of Fermi Level Pinning at the Hexagonal Boron Nitride/Metal Interface", *ACS appl. mater. interfaces*, 2018 (in press).

[23] T. Yamada, H. Kato, Y. Okigawa, M. Ishihara, M. Hasegawa, "Electrical Properties of Bilayer Graphene Synthesized by Surface Wave Microwave Plasma Techniques at Low Temperature", *Nanotechnology*, 28, 025725 (2017).

- [22] S. Kurabayashi, and [K. Nagashio](#), "Transport properties of the top and bottom surfaces in monolayer MoS₂ grown by chemical vapor deposition", *Nanoscale*, 9, 13264 (2017).
- [21] I. Lovchinsky, J. D. Sanchez-Yamagishi, E. K. Urbach, S. Choi, S. Fang, T. I. Andersen, [K. Watanabe](#), [T. Taniguchi](#), A. Bylinskii, E. Kaxiras, P. Kim, H. Park, M. D. Lukin, "Magnetic resonance spectroscopy of an atomically thin material using a single-spin qubit", *Science*, 355, 503-507 (2017).
- [20] M. Yamamoto, S. Nakaharai, [K. Ueno](#), [K. Tsukagoshi](#), "Self-Limiting Oxides on WSe₂ as Controlled Surface Acceptors and Low-Barrier Hole Contacts", *Nano Lett.*, 16, 2720-2727 (2016).
- L. Zhou, A. Zubair, Z. Wang, X. Zhang, F. Ouyang, K. Xu, W. Fang, [K. Ueno](#), J. Li, T. Palacios, J. Kong, and M. S. Dresselhaus, "Synthesis of High-Quality Large-Area Homogenous 1T' MoTe₂ from Chemical Vapor Deposition", *Adv. Mater.*, 28, 9526-9531 (2016).
- [19] Y. Hattori, [T. Taniguchi](#), [K. Watanabe](#), and [K. Nagashio](#), "Anisotropic breakdown strength of single crystal hexagonal Boron Nitride", *ACS appl. mater. interfaces*, 8, 27877 (2016).
- [18] S. Bhandari, G.-H. Lee, A. Klales, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, E. Heller, P. Kim, and R. M. Westervelt, "Imaging Cyclotron Orbits of Electrons in Graphene", *Nano Lett.*, 16, 1690-1694 (2016).
- [17] R. Kato, S. Minami, Y. Koga, [M. Hasegawa](#), "High growth rate chemical vapor deposition of graphene under low pressure by RF plasma assistance", *Carbon*, 96, 1008-1013 (2016).
- [16] J. Velasco, L. Ju, D. Wong, S. Kahn, J. Lee, H.-Z. Tsai, C. Germany, S. Wickenburg, J. Lu, [T. Taniguchi](#), [K. Watanabe](#), A. Zettl, F. Wang, and M. F. Crommie, "Nanoscale Control of Rewriteable Doping Patterns in Pristine Graphene/Boron Nitride Heterostructures", *Nano Letters*, 16, 1620-1625 (2016).
- [15] [K. Ueno](#), "Introduction to the Growth of Bulk Single Crystals of Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides [Review]", *Journal of the Physical Society of Japan*, 84, 121015 (2015).
- [14] S. Dai, Z. Fei, Q. Ma, A. S. Rodin, M. Wagner, A. S. Mcleod, M. K. Liu, W. Gannett, W. Regan, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, M. Thiemens, G. Dominguez, A. H. C. Neto, A. Zettl, F. Keilmann, P. Jarillo-Herrero, M. M. Fogler, and D. N. Basov, "Tunable Phonon Polaritons in Atomically Thin Van Der Waals Crystals of Boron Nitride", *Science*, 343, 1125-1129 (2015).
- [13] M. Yamamoto, S. Dutta, S. Aikawa, S. Nakaharai, [K. Wakabayashi](#), M. S. Fuhrer, [K. Ueno](#), [K. Tsukagoshi](#), "Self-limiting layer-by-layer oxidation of atomically thin WSe₂", *Nano Letters*, 15, 2067-2073 (2015).
- [12] Y. Okigawa, R. Kato, M. Ishihara, [T. Yamada](#), [M. Hasegawa](#), "Electrical properties and domain sizes of graphene films synthesized by microwave plasma treatment under a low carbon concentration", *Carbon*, 82, 60 (2015).
- [11] Y. Hattori, T. Taniguchi, [K. Watanabe](#) and [K. Nagashio](#), "Layer-by-Layer Dielectric Breakdown of Hexagonal Boron Nitride", *ACS nano*, 9, 916 (2015).
- [10] J. D. Caldwell, A. V. Kretinin, Y. Chen, V. Giannini, M. M. Fogler, Y. Francescato, C. T. Ellis, J. G. Tischler, C. R. Woods, A. J. Giles, M. Hong, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, S. A. Maier, and K. S. Novoselov, "Sub-Diffractive Volume-Confined Polaritons in the Natural Hyperbolic Material Hexagonal Boron Nitride", *Nature Communications*, 5, 5221 (2014).
- [9] S.-L. Li, K. Komatsu, S. Nakaharai, Y.-F. Lin, M. Yamamoto, X. Duan, and [K. Tsukagoshi](#), "Thickness Scaling Effect on Interfacial Barrier and Electrical Contact to Two-Dimensional MoS₂ Layers", *ACS Nano*, 8, 12836-12842 (2014)
- [8] K. Kanayama, [K. Nagashio](#), T. Nishimura, A. Troiumi, "Large Fermi energy modulation in graphene transistors with high-pressure O₂-annealed Y₂O₃ topgate insulators", *Appl. Phys. Lett.*, 104, 083519 (2014),
- [7] Y.-F. Lin, Y. Xu, S.-T. Wang, S.-L. Li, M. Yamamoto, A. Aparecido-Ferreira, W. Li, H. Sun, S. Nakaharai, W.-B. Jian, [K. Ueno](#), and [K. Tsukagoshi](#), "Ambipolar MoTe₂ Transistors and Their Applications in Logic Circuits", *Adv. Mater.*, 26, 3263-3269 (2014),
- [6] R. Kato, K. Tsugawa, [T. Yamada](#), M. Ishihara, [M. Hasegawa](#), "Improvement of Multilayer Graphene Synthesis on Copper Substrate by Microwave Plasma Process Using Helium at Low-Temperatures", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 015505 (2014).
- [5] C. R. Dean, L. Wang, P. Maher, C. Forsythe, F. Ghahari, Y. Gao, J. Katoch, M. Ishigami, P. Moon, M. Koshino, T. Taniguchi, [K. Watanabe](#), K. L. Shepard, J. Hone, and P. Kim, "Hofstadter's butterfly and the fractal quantum Hall effect in moire superlattices", *Nature*, 497, 598-602 (2013).
- [4] Y. Okigawa, K. Tsugawa, [T. Yamada](#), M. Ishihara, [M. Hasegawa](#), "Electrical characterization of graphene films synthesized by low-temperature microwave plasma chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters*, 103, 153106 (2013).
- [3] R. Ifuku, [K. Nagashio](#), T. Nishimura, and A. Toriumi, "The density of states of graphene underneath a metal electrode and its correlation with the contact resistivity", *Appl. Phys. Lett.*, 103, 033514 (2013).
- [2] S.-L. Li, [K. Wakabayashi](#), Y. Xu, S. Nakaharai, K. Komatsu, W.-W. Li, Y.-F. Lin, A. A.-Ferreira, and [K. Tsukagoshi](#), "Thickness-Dependent Interfacial Coulomb Scattering in Atomically Thin Field-Effect Transistors", *Nano Lett.*, 13, 3546-3552 (2013).
- [1] H. S. Song, S. L. Li, L. Gao, Y. Xu, [K. Ueno](#), J. Tang, Y. B. Cheng, and [K. Tsukagoshi](#), "High-performance top-gated monolayer SnS₂ field-effect transistors and their integrated logic circuits", *Nanoscale*, 5, 9666 (2013).
- [学会発表, 抜粋] (招待のみ計 122 件)
- [14] [K. Nagashio](#), "Gap engineering and reliability study for 2Delectronics", 6th Int. Conf. on Semiconductor Technology for ULSI & TFT, (May. 23, 2017, Schloss Hernstein, Hernstein, Austria).
- [13] [K. Tsukagoshi](#), "Heterojunctions for atomically thin 2D semiconductors based on two-dimensional transition metal dichalcogenides", 17th International Meeting on Information Display (IMID 2017), (Aug. 28-31, Busan, Korea).
- [12] [K. Nagashio](#), "Interface engineering for 2D electronics", 2017 NEA Symposium of Emerging Materials Innovation, (October, 18, 2017, Lotte hotel, Seoul, Korea).

[11] T. Yamada, H. Kato, Y. Okigawa, M. Ishihara, M. Hasegawa, "Graphene synthesizes using plasma techniques for transparent conductive materials", E-MRS 2016 SPRING MEETING (May 2-6, 2016, Lille, France).

[10] Kosuke Nagashio, "Gap engineering & reliability study for 2D electronics", Graphene week (June 13-17, 2016, Warsaw, Poland).

[9] Keiji Ueno, "Layered Chalcogenide Materials: Basic Properties and Application to Atomic-layer Electronics", 8th Int. Symp. on Adv. Plasma Sci. & its Appl. for Nitrides and Nanomater. (ISPlasma2016) / 9th Int. Conf. Plasma-Nano Technology and Science (ICPLANTS2016), Nagoya, Japan, Mar 10, 2016.

[8] M. Hasegawa, "Development of graphene and related materials in TASC", Graphene Canada 2015 (October 15, 2015, Montreal, Canada).

[7] Kazuhito Tsukagoshi, "Atomically thin semiconducting channels for future nano-electronics", XXIV International Materials Research Congress (IMRC 2015) (Aug. 16-20, 2015, Cancun, Mexico).

[6] Kosuke Nagashio, "Graphene field effect transistor application", 1st Japan-EU workshop on graphene and related 2D materials (Nov. 2, 2015, Sapia tower, Tokyo, Japan).

[5] Kazuhito Tsukagoshi, "Atomically thin semiconducting channels for future nano-electronics", 5th Graphene and 2D Materials Satellite Symposium (June 7, 2014, Los Angeles), K1.

[4] M. Hasegawa, "Synthesis of graphene using plasma for high throughput production", 2014 International Graphene Workshop, 2014/11/11, Hsinchu, Taiwan.

[3] K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Quantum capacitance measurement of bilayer graphene", 225rd ECS meeting, (May 12, 2014, Orlando).

[2] M. Hasegawa, T. Yamada, M. Ishihara, Y. Okigawa, R. Kato, K. Tsugawa, "Low Temperature and Roll-to-Roll Synthesis of Graphene by Plasma CVD for Transparent Conductive Film Applications", 15th Asian Chemical Congress 2013, 2013/08/20, Singapore.

[1] Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, "Optical Properties of Boron Nitride Single Crystals", CLEO-PR 2013 (June 30-July 4, 2013 Kyoto, Japan).

〔図書〕(計 11 件)

[10]長汐晃輔,「グラフェンの伝導特性とエネルギーギャップ形成」二次元物質の科学 グラフェンなどの分子シートが生み出す新世界, 2017, 日本化学会編 化学同人 p61-67.

[9]長汐晃輔, 電界効果トランジスタにおけるゲートスタック形成と評価, 「カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線, エヌ・ティー・エス, 東京, 2016, pp.168-175. [8]Akira Toriumi, Kosuke Nagashio, 「Metal contacts to Graphene」, 2D materials for nanoelectronics, edited by M.Houssa, A. Dimoulas, A. Molle, CRC Press, 2016, pp.53-78.

[7]上野啓司, 安藤淳, 島田敏宏 共同監修, 「カルコゲナイド系層状物質の最新研究」シーエムシー出版, 2016, ISBN 978-4-7813-1166-1

[6]長谷川雅考, 「大面積高速合成」カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線 (分担執筆), エヌ・ティー・エス, 丸山茂夫監修, 2016

[5]沖川侑揮, 長谷川雅考, 「グラフェン透明導電膜利用技術開発」カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線 (分担執筆), エヌ・ティー・エス, 丸山茂夫監修, 2016

[4]上野啓司, 「塗布形成グラフェン透明導電膜」 「塗布型透明導電膜の材料開発と成膜・パターン形成技術」第2節 [1], サイエンス&テクノロジー, 2015

[3]K. Nagashio, A. Toriumi, 「Graphene/metal contact」 in Frontiers of graphene and carbon nanotubes-Devices and applications-, Springer, 2015, pp.53-78.

[2]上野啓司, 塚越一仁, 「原子層エレクトロニクスに向けたカルコゲナイド系層状物質の基礎物性と薄膜形成手法」応用物理 Vol.83, No.4, 274-278, 2014

[1]上野啓司, グラフェン透明電極の溶液塗布による作製と応用, グラフェン・コンポジット 第2編第4章, S&T 出版, 2014年07月15日発刊.

〔その他〕

ホームページ等

○東京大学マテリアル工学専攻 長汐研究室
http://webpark1753.sakura.ne.jp/nagashio_lab/

○物質・材料研究機構 塚越グループ
http://www.nims.go.jp/pi-ele_g/index.html

○埼玉大学大学院理工学研究科 上野研究室
<http://surface-www.chem.saitama-u.ac.jp/wiki/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

長汐 晃輔 (NAGASHIO, Kosuke)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：20373441

(2)研究分担者

塚越 一仁 (TSUKAGOSHI, Kazuhito)
物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究員
研究者番号：50322665

上野 啓司 (UENO, Keiji)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：40223482

長谷川 雅考 (HASEGAWA, Masataka)
産業技術総合研究所・ナノ材料研究部門・グループ長
研究者番号：20357776

(3)連携研究者

渡邊 賢司 (WATANABE, Kenji)
物質・材料研究機構・主幹研究員
研究者番号：20343840

山田 貴壽 (YAMADA, Takatoshi)
産業技術総合研究所・ナノ材料研究部門・研究員
研究者番号：30306500