

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13707

研究課題名(和文) 重金属イオン自在ドーピングによる室温安定フレキシブル単一光子源の開発

研究課題名(英文) Development of Room-Temperature Stable and Flexible Single Photon Source with Controllable Heavy-ion Doping to Atomically Thin Layered Materials

研究代表者

加藤 俊顕 (KATO, Toshiaki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20502082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：原子層物質(TMD)を活用したフレキシブル単一光子源の開発に向け研究を行い以下の成果が得られた。(1) TMD中における励起子拡散ダイナミクスの詳細な物理機構を解明した。(2) 独自に開発した急速冷却CVD法により高品質・大結晶の単層単結晶TMDの合成に成功した。(3) マイルドプラズマプロセスがTMD構造と物性に与える効果の解明を行い、酸素マイルドプラズマ処理により二層TMDの相関相互作用が低下し間接遷移から直接遷移へと変化する可能性が見出された。(4) フレキシブル光学素子の一例としてTMDを用いた透明フレキシブル太陽電池の試作を行い、ショットキー構造を採用することで世界最高の発電効率を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子オーダーの厚みからなる原子層物質(TMD)は、近年世界中で大きな注目を集めている新規ナノ材料である。本研究ではこのTMDを活用したフレキシブル単一光子源の開発を試みた。単一光子源実現に向けた根幹課題である、高品質結晶合成と励起子拡散機構の解明を実現した点は特筆すべき重要な成果である。特に、これまで未解明であった励起子拡散機構を明らかにした点は、単一光子源応用に関わらず基礎学術的に重要な意義を持つ成果である。フレキシブル素子応用の一例として取り組んだ透明太陽電池に関しては、TMD太陽電池の中で世界最高の発電効率を実現しており、社会的にも今後非常に重要な貢献が期待できるものである。

研究成果の概要(英文)：We obtained following important results relating with the development of flexible single photon source with transition metal dichalcogenide (TMD). (1) Detailed diffusion dynamics of excitons in TMD have been revealed under the various temperature ranges from 4.5 to 300 K. (2) High quality and large monolayer TMD can be grown with our developed rapid cooling CVD system. (3) Effects of mild plasma treatment on the structure and properties of TMD have been investigated. Inter layer interaction can be modified by mild oxygen plasma treatment for double layer TMD. (4) Flexible and transparent solar cell has been developed with the few-layer TMD under the Schottky device configurations. The highest power conversion efficiency can be achieved within TMD-based solar cell.

研究分野：プラズマ材料科学

キーワード：原子層物質 高品質合成 励起子 単一光子 フレキシブルデバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一つの光子からなる光である単一光子発光は、量子力学的性質を如実に反映するため、極めてコヒーレントな情報伝達媒体として、量子情報通信等への応用が期待されている。単一光子の生成は、一般にダイヤモンド中の窒素 空隙欠陥、あるいは半導体量子ドット等を用いた手法により行われている。これに対して、近年我々は単一光子発生源として期待できる新たな材料を見出した。遷移金属とカルコゲン原子から構成される本物質は遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) と呼ばれており、原子オーダーの厚みを有する二次元シート材料である。バンドギャップを持たない、類似の構造を持つグラフェンとは異なり TMD の場合は、直接遷移型半導体材料であるため、明確な蛍光特性が観測される。我々は、この TMD の蛍光スペクトルにコヒーレントな発光成分が存在することを見出し、それらが空間的に局在した励起子からの発光であることを世界で初めて明らかとした [T. Kato and T. Kaneko, ACS Nano 8(2014)12777]。この様な局在励起子からの発光は、単一光子発光の基本となる現象であるため、TMD の量子デバイス応用の可能性を示した重要な成果である。TMD はフレキシブルな二次元シート材料であるため、TMD を用いることで従来材料のダイヤモンドや量子ドットでは不可能であったフレキシブル単一光子源という、量子情報通信の新たな研究展開が期待できる。一方で、TMD からの単一光子発生は原理実証がなされたばかりの研究初期段階であり、発生機構解明、能動的発光、動作温度の向上等多くの問題が残されている。本研究ではこれ等の問題に対し、プラズマ物理学とナノ材料科学の両側面からアプローチすることで解決を試みる。

2. 研究の目的

本研究は、近年注目を集めている原子オーダーの厚みからなる二次元シート物質である TMD に着目し、TMD を用いたフレキシブル単一光子源の開発、ならびに室温動作の実証を目指すものである。従来単一光子源はダイヤモンドや化合物半導体等の強固な固体結晶においてのみ実現されてきた。本研究で機械的柔軟性に富んだ TMD を利用した単一光子源の開発を実現することで、量子情報通信のフレキシブルエレクトロニクス応用という新たな研究基盤の開拓が大いに期待できるものである。

3. 研究の方法

本研究では、機械的にバルク結晶から剥離した単層 TMD と熱 CVD 法により合成した単層単結晶 TMD の二種類を用いて測定を行った。結晶構造は原子間力顕微鏡 (AFM)、ラマン分光分析、及び微分反射スペクトルにより評価した。光学物性は 4 ~ 300 K の範囲で温度可変な光学システムにおいて、蛍光 (PL) スペクトルを取得することで行った。また、TMD への不純物ドーピングに関しては、電子温度が 0.3 eV 以下まで低下したマイルドプラズマを活用したプロセスにより行った。

4. 研究成果

(1) TMD の励起子拡散ダイナミクス の解明

本研究の最終目的である原子層物質を用いたフレキシブル単一光源の開発には、原子層物質からの発光を司っている励起子の振る舞いを詳細に解明する必要がある。そこでまずは、原子層物質中の励起子拡散挙動の解明を試みた。

測定に用いた TMD 結晶は、バルクの二硫化タングステン (WS_2) 結晶から、スコッチテープにより機械的剥離で採取した。また、励起子拡散における基板との相互作用を無視するため、予めくし形電極を電子ビームリソグラフィによりパターンニング形成し、その電極パターン領域に単層 WS_2 を転写することで、架橋単層 WS_2 結晶を作製した。

この試料に対して、幅広い温度範囲 (4.5 ~ 300 K) において PL スペクトルを測定した (図 1(a))。その結果、まず 4.5 ~ 75 K の低温領域では、電荷と衝突した中性励起子のほとんどが荷電励起子 (トリオン) となる極めて高いトリオン生成効率を持つことが判明した。一方で電荷と衝突しなかった中性励起子に関しては、半値幅が温度に依存せず低い値を示すことから、非常に低い散乱確率で原子層物質中を自由に移動すると考

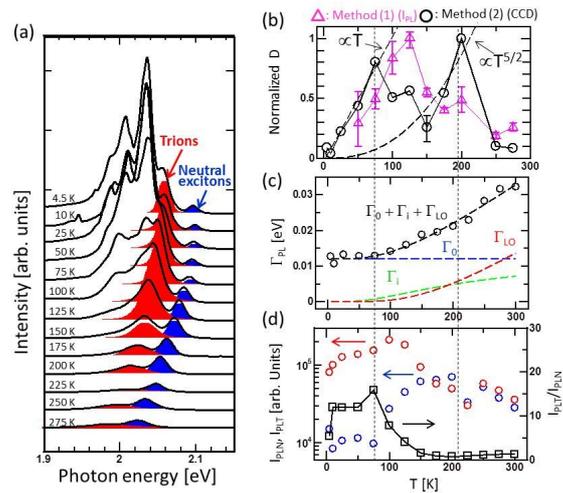


図 1. (a) 単層 WS_2 の異なる温度範囲における PL スペクトル。赤、及び青領域はトリオンと中性励起子の積分発光強度をそれぞれ表す。(b-c) (b) 異なる二つの方法 (Method(1): 発光強度のサイズ依存性, Method(2): CCD による直接測定) で算出した規格化拡散係数 (D)、(c) PL 半値幅 (PL) (○は実験結果、破線はフィテイング曲線) (0: 定常項, i: イオン化不純物項, LO: フォノン散乱項、及び (d) 積分発光強度 (中性励起子: I_{PLN} 、トリオン: I_{PLT})、積分発光強度比 (I_{PLT}/I_{PLN}) の温度依存性。

えられる。75~225 K の中温度領域では、荷電不純物散乱による効果として知られている温度の5/2乗に比例した拡散係数の振る舞いが確認された(図1(b-d))。これは、温度の増加と共にトリオン生成効率が低下し、電荷と衝突した中性励起子の一部がトリオンにならずにそのまま中性励起子として拡散する振る舞いによるものとして説明できる。225 K 以上の高温領域では、トリオン生成効率は著しく低下することが分かった。また温度の増加と共に拡散係数が著しく低下し、かつ半値幅が増加していることからフォノン散乱による効果が支配的となることが判明した(図1(b-d))。

この様に、単層 TMD 中の励起子拡散ダイナミクスを幅広い温度範囲で明らかにしたのは本研究が初めてのものであり、基礎物理及び産業応用両観点で非常に重要な成果である。

(2) 単層単結晶遷移金属ダイカルコゲナイドの大結晶合成

単一光子発光を実現する上では、励起子を微小欠陥に捕捉し、そこからの発光を実現する必要がある。この際、捕捉サイト密度が高いと多光子となり単一光子発光が実現できない。つまり、単一光子発光には励起子を捕捉する欠陥を低密度範囲で制御する必要がある。このためには、まず欠陥密度の非常に低い高品質単結晶 WS₂ を合成する必要がある。そこで、我々は単層 WS₂ の高品質・大結晶合成に取り組んだ。

CVD 法は TMD 合成で最も一般的に用いられる手法であるが、合成できる単結晶サイズは通常 100 μm 程度が上限となっていた。TMD 合成の場合、硫化物を扱う不安定な反応であるため、装置の腐食等の観点から長時間の合成実験は技術的に困難である。従って、高品質・大結晶化を実現するには、必然的に結晶成長の高速化が重要な課題となる。高速成長を実現するには、基板温度を高温にする必要があるが、一方でこの場合、成長前駆体の基板からの脱離反応が進行するため、気相から供給される実効的な成長前駆体フラックスが低下してしまう。つまり、高速成長と高効率成長前駆体供給を同時に実現することが従来 CVD 法では困難であった。そこで、合成中に一時的に基板を急冷しその後再加熱を行う急速冷却 CVD(RCCVD)法を考案した。一時的に冷却することで気相から基板への成長前駆体付着効率を一時的に高め、その後基板温度を高くすることで結晶成長を促す手法である。

冷却速度、冷却時間、再加熱温度等の合成パラメータを精密に最適化した結果、急速冷却効果を取り入れることで 320 μm の結晶サイズをもつ巨大単層単結晶 WS₂ の合成に成功した(図2(a-c))。明瞭な蛍光特性に加え、原子レベルで均質な WS₂ が得られたことが走査型透過電子顕微鏡(STEM)像から確認されたことから、本手法で合成した WS₂ が高品質であることが明らかになった(図2(d))。絶縁基板上に直接合成した単層単結晶 TMD としては世界最大単結晶サイズの一つである(図2(e))。

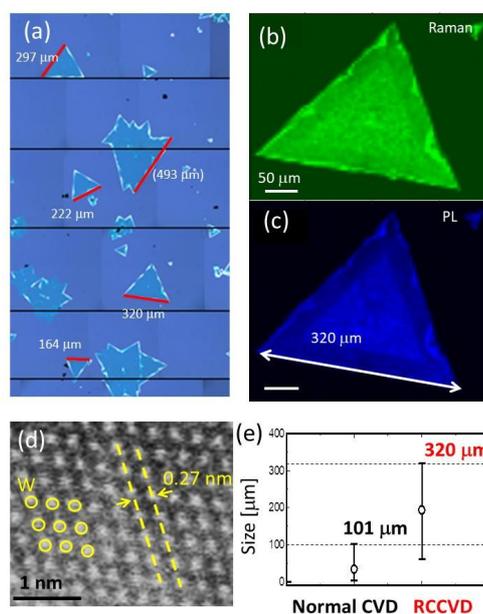


図2: (a) RCCVD 法により合成した大結晶 WS₂ の(a)光学顕微鏡像、(b)ラマン強度マッピング像、(c)PL 強度マッピング像、及び(d)STEM 像。(e)従来 CVD 法と RCCVD 法により合成した単層単結晶 WS₂ のサイズ比較。

(3) マイルドプラズマによる不純物ドーピング

単一光子発光には、高品質 TMD に対して密度を制御した不純物ドーピングを行う必要がある。不純物ドーピング手法としては様々なドーパントを供給できるプラズマプロセスが有力である。しかしながら、プラズマ状態が TMD に与える効果は世界的に見ても明らかになっていない。そこでプラズマによる不純物ドーピングを行う前段階として、プラズマプロセスが TMD に与える効果の解明を行った。通常のプラズマでは TMD へ多量の欠陥が導入されることが容易に推測できる。そこで本研究では、電子温度が 0.3 eV 以下となる低電子温度マイルドプラズマを生成し、マイルドプラズマが TMD に与える影響の解明を行った。AFM 測定の結果から、マイルド酸素プラズマ照射後においても明確な原子層構造は維持されており、また表面の平坦性も保たれていることが分かった。つまり、マイルドプラズマ照射により原子層構造そのものが破壊されていないことが判明した。そこで、AFM 測定を行った同一サンプル領域において PL 強度マッピング測定を行ったところ、AFM 測定で二層領域と判明した領域でのみ PL 強度の著しい増大が確認された。二層領域における典型的な PL スペクトルから、マイルドプラズマ照射において発光強度に加え、発光スペクトル自体も変化していることが分かった。また、同様の実験をマイルド水素プラズマ、及びマイルド窒素プラズマを用いても行ったが、PL 強度の増大に関しては、マイルド酸素プラズマにおいてのみ顕著に確認された。また PL 強度がプラズマ照射時間の増加に伴って、継続的に増加することも判明した。

そこで、この PL 特性変化の起源を明らかにするため、照射前後の TMD 結晶の同一箇所にお

る構造変化を AFM により測定した。その結果、照射により二層領域においてのみ、膜厚が選択的に増大していることが判明した(図 3(a))。さらにこの膜厚変化と PL 強度変化を初期の TMD の膜厚に対してプロットしたところ、上記で説明した通り、二層領域でのみ膜厚の増大と PL 強度の増大が顕著に表れた(図 3(b,c))。原子レベルでの具体的な反応に関しては現在調査中であるが、PL 強度が増大した点、強度増大後のスペクトル形状が単層 TMD のものと類似している点、及び膜厚が 2 nm 程度増加している点から判断し、現時点では酸素プラズマにより、表面反応あるいは層間反応が生じ、結果として二層 TMD の相関相互作用が低下(相関距離の増大等による)したと考えている(図 3(d,e))。相関相互作用が低下することで、間接遷移から直接遷移への変化が生じ、結果として PL 強度の増大につながったと考えられる。このような PL 強度の増大にみられる量子効率の向上は、様々なデバイス応用の高性能化につながる重要な成果である。今回我々が開発した手法により選択的に二層 TMD の発光効率を向上する本手法は、単一光子発光に必須なプラズマドーピングプロセスに関して、重要な知見となるものである。

(4) 遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた透明フレキシブル太陽電池の開発

本研究の最終目的は TMD を用いたフレキシブル単一光子発光の実現であるが、研究を進める中で、TMD が類似のフレキシブル素子としてフレキシブル太陽電池にも応用展開が可能であることが判明した。そこで、上述の励起子拡散ダイナミクスの知見を最大限活用し、TMD を用いた透明フレキシブル太陽電池の開発を行った。

TMD を用いた太陽電池に関しては、pn 接合型やヘテロ接合型などにより、既に多くの報告がなされている。一方で、これらの手法では複雑なデュアルゲート構造、あるいは局所的化学ドーピングが必須なため、実用上重要である大面積化に関しては、大きな障壁が残されている。

これに対し、比較的簡便に太陽電池の作製が可能な手法として知られているデバイス構造にショットキー型構造がある。この場合、金属と半導体材料間のショットキー障壁を利用する発電であり、半導体材料に適切な金属材料を接合させるだけで太陽電池としての動作が可能である。このため、スケールアップが容易であり、上記の問題とされてきた大面積化に向けて非常に大きな可能性を秘めた手法と言える。しかしながら、数層 TMD を用いたショットキー接合型の太陽電池はこれまで世界中でほとんど報告されておらず、高効率発電にも至っていないのが現状である。そこで本研究では、数層 TMD を用いたショットキー型太陽電池の実現と高効率化、及び大面積化に向けた研究を行った。

高性能ショットキー太陽電池を作製するには、片側でショットキー障壁を作り、対向側ではオーミック接合をするデバイス構造が必要である(図 4(a))。そこで、様々な両端電極種の組み合わせを変化させ、仕事関数差を制御し、発電特性を測定した。その結果両端の仕事関数差に比例して発電効率が上昇し、Ni-Pd 電極の組み合わせを用いた場合に最大発電効率が得られることが分かった(図 4(b))。また、光電流マッピング測定により発電領域の特定を行ったところ、電極と TMD との接合面でのみ明確な光電流が観測され、本手法で作成した TMD 太陽電池がショットキー型デバイスであることが証明された。

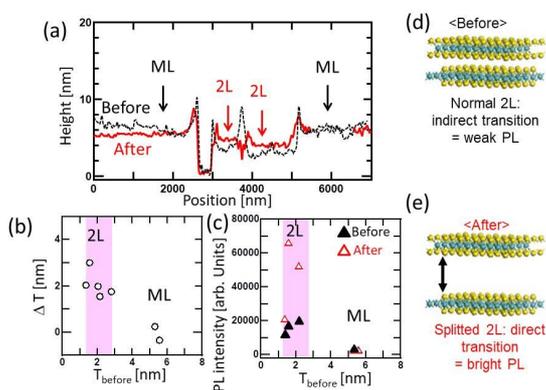


図 3: マイルドプラズマ照射前後における TMD 高さプロファイルの比較。(b,c) (b) プラズマ照射による高さ変化 (ΔT) と (c) プラズマ照射前後の PL 強度に関する初期 TMD 高さ依存性。(d,e) プラズマ照射 (d) 前 (e) 後の予想構造変化模式図。

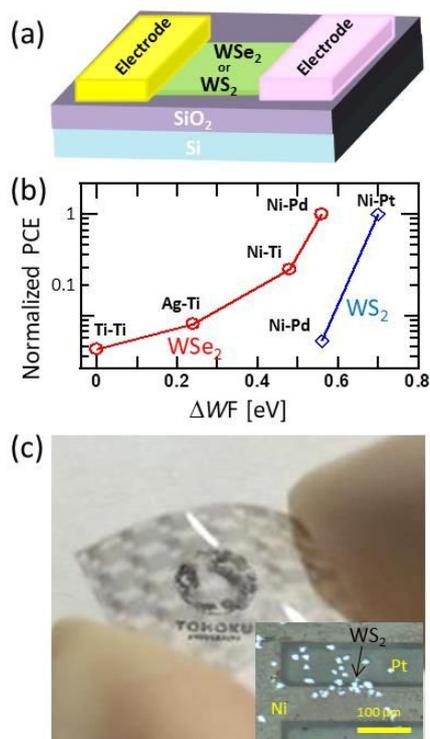


図 4: (a) 異種電極接合ショットキーデバイスの典型的なデバイス構造図。(b) 両端電極対の仕事関数差に対する発電効率のプロット。(c) 透明フレキシブル基板上に形成した TMD 太陽電池の光学写真。

前述の研究により明らかにした励起子拡散ダイナミクスに基づき本デバイスの、電極間距離、及び基板からの不純物散乱の抑制などの最適化を行った結果、発電効率を 0.7 %まで向上させることに成功した。この値は、数層 TMD 太陽電池において、現在報告されている中で、最も高い発電効率である。さらに本手法の利点である簡便性を活用し大面積透明フレキシブル基板上へのショットキー型 TMD 太陽電池の試作を行った。その結果透明フレキシブル基板上においても明確な太陽光発電を観測することに成功した(図 4(c))。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

B. Xu, T. Kaneko, and T. Kato, "Improvement in growth yield of single-walled carbon nanotubes with narrow chirality distribution by pulse plasma CVD", *Frontiers of Chemical Science and Engineering (Invited)*, 査読有, 2019, 印刷中.

H. Suzuki, N. Ogura, T. Kaneko, T. Kato, "Highly stable persistent photoconductivity with suspended graphene nanoribbons", *Scientific Reports*, 査読有, 8, 2018, 11819-1-9. DOI: 10.1038/s41598-018-30278-z.

T. Akama, W. Okita, R. Nagai, C. Li, T. Kaneko, T. Kato, "Schottky solar cell using few-layered transition metal dichalcogenides toward large-scale fabrication of semitransparent and flexible power generator", *Scientific Reports*, 査読有, 7, 2017, 11967-1-10. DOI: 10.1038/s41598-017-12287-6.

B. Xu, T. Kaneko, Y. Shibuta, T. Kato, "Preferential synthesis of (6,4) single-walled carbon nanotubes by controlling oxidation degree of Co catalyst", *Scientific Reports*, 査読有, 7, 2017, 11149-1-9. DOI: 10.1038/s41598-017-11712-0.

C. Li, Y. Yamaguchi, T. Kaneko, and T. Kato, "Large single-domain growth of monolayer WS₂ by rapid-cooling chemical vapor deposition", *Applied Physics Express*, 査読有, 10, 2017, 075201-1-4. DOI: 10.7567/APEX.10.075201.

U. Khalilov, A. Bogaerts, B. Xu, T. Kato, T. Kaneko, and E. C. Neyts, "How the alignment of adsorbed ortho H pairs determines the onset of selective carbon nanotube etching", *Nanoscale*, 査読有, 9, 2017, 1653-1661. DOI: 10.1039/C6NR08005G.

T. Kato and T. Kaneko, "Transport Dynamics of Neutral Excitons and Trions in Monolayer WS₂", *ACS Nano*, 査読有, 10, 2016, 9687-9694. DOI: 10.1021/acsnano.6b05580.

H. Suzuki, T. Kaneko, Y. Shibuta, M. Ohno, Y. Maekawa, and T. Kato, "Wafer scale fabrication and growth dynamics of suspended graphene nanoribbon arrays", *Nature Communications*, 査読有, 7, 2016, 11797-1-10. DOI: 10.1038/ncomms11797.

[学会発表](計 80 件)

T. Kato, Nanoscale plasma processing for synthesis and applications of graphene nanoribbon, ISPlasma 2019/IC-PLANTS2019, Nagoya Institute of Technology (Invited), 2019.

T. Kato, グラフェンナノリボンの集積化合成と不揮発性メモリ応用に向けたプラズマプロセス, 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会(Invited), 2019.

T. Kato, Bottom up Synthesis and Optoelectrical Application of Suspended Graphene Nanoribbon Arrays in Wafer Scale, 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit (Invited), 2018.

T. Kato, Schottky solar cell using few-layered TMDs, 3rd EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (Invited), 2018.

T. Kato, Highly-Integrated Synthesis and Optoelectrical Applications of Suspended Graphene Nanoribbons, 1st International Workshop on 2D Materials (Invited), 2018.

T. Kato, Wafer-scale Fabrication of Suspended Graphene Nanoribbon Arrays -from Growth Dynamics to Optoelectrical Applications-, The AVS 65th International Symposium & Exhibition (Invited), 2018.

T. Kato, Wafer-Scale Synthesis and Optoelectrical Applications of Bottom-up Graphene Nanoribbons, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会(Invited), 2018.

T. Kato, Bottom-up synthesis of atomically-precise low-dimensional nanocarbon materials by nanoscale plasma processing, The 7th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology (ICMAP 2018) (Invited), 2018.

T. Kato, Integrated synthesis of graphene nanoribbons toward high performance optoelectrical devices, 10th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2018) (Invited), 2018.

加藤 俊顕, 遷移金属ダイカルコゲナイドの成長とデバイス応用, 第 148 回結晶工学分科会研究会(Invited), 2018.

加藤 俊顕, Atomic Engineering of Nanocarbon Materials with Nanoscale Plasma Processing, 最先端プラズマプロセス: 未来への挑戦ー産官学連携による新たなイノベーションー(Invited), 2018.

T. Kato, Large Scale Integration of Suspended Graphene Nanoribbons with Nanobar-Catalyzed Advanced Plasma Processing, The 3rd International Conference on

Two-Dimensional Layered Materials (ICON-2DMAT 2017) (Invited), 2017.

T. Kato, Atomic-Structure-Controlled Synthesis of Nanocarbon Materials with Nanoscale Plasma Processing, The 2017 International Conference on Functional Carbons (ICFC), National Taiwan University of Science and Technology (NTUST) (Invited), 2017.

加藤 俊顕, プラズマアトムミックエンジニアリングによる低次元ナノカーボン材料の構造制御合成と応用, H29 年度 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 微粒子-流体混成系がもたらす多様な機能性(Invited), 2017.

T. Kato, Atomic-Structure-Controlled Synthesis of Atomically-Thin Layered Materials with Nanoscale Plasma Processing, International union of materials research society-International conference of advanced materials (IUMRS-ICAM) (Invited), 2017.

T. Kato, Nanoscale Plasma Processing for Atomic Engineering of Nano Carbon Materials (Plenary), 2017.

加藤 俊顕, マイルドプラズマ反応を用いたグラフェンナノリボンの大規模集積化合成, 第 25 回プラズマ新領域研究会 『フレキシブルデバイスのためのプラズマプロセス』(Invited), 2017.

加藤 俊顕, 単層 WS₂ における原子・分子の局所・選択的付加による局在励起子の観測, 物性研究所短期研究会 「原子層上の活性サイトで発現する局所機能物性」(Invited), 2016.

加藤 俊顕, グラフェンナノリボンウェハースケール集積化合成手法の開発, 平成 28 年度 第 2 回カーボンナノ材料研究会(Invited), 2016.

加藤 俊顕, 2次元原子層物質の構造制御合成とプラズマ機能化, 電子情報通信学会 シリコン材料デバイス研究会(SDM)「MOS デバイス・メモリ高性能化 - 材料・プロセス技術」(Invited), 2016.

〔図書〕(計 2 件)

加藤 俊顕, 鈴木 弘朗, 金子 俊郎, 『プラズマ CVD における成膜条件の最適化に向けた反応機構の理解とプロセス制御・成膜事例』, Science & Technology, 2018, 328 (199-210).

加藤 俊顕, 金子 俊郎, 『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, 286 (129-139).

〔その他〕

学会誌等

加藤 俊顕, 金子 俊郎, “ プラズマ CVD によるグラフェンナノリボンのボトムアップ合成 ”, 『プラズマ・核融合学会誌』, プラズマ・核融合学会, Vol. 94, No. 5, pp. 235-241, 2018.

加藤 俊顕, 金子 俊郎, “ 原子層シートを利用した透明フレキシブル太陽電池の開発 ”, 『クリーンエネルギー』, 日本工業出版株式会社, Vol.27, No.4, pp.21-26, 2018.

加藤 俊顕, 金子 俊郎, “ 2次元シートを使った透明で曲がる太陽電池 ”, 『Web Journal - 次世代エネルギー太陽電池・二次電池・燃料電池-』, アクトライ・エム, Vol.23, No.9, pp.6-9, 2018.

加藤 俊顕, 金子 俊郎, “ グラフェンナノリボンの革新的集積化合成法の開発 ”, 『応用物理』, 応用物理学学会, Vol.86, No.7, pp.581-585, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 高島 圭介

ローマ字氏名: (TAKASHIMA, keisuke)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 工学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 70733161