

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05408

研究課題名(和文) 極限ナノ物質の複合化による新奇創発量子物性の誘起とその応用

研究課題名(英文) Emergent quantum properties in complex nanomaterials and their applications

研究代表者

宮内 雄平 (Miyuchi, Yuhei)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：10451791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カーボンナノチューブや原子層半導体に代表される極限的に細く薄いナノ物質の人工的複合構造化により、ナノ物質固有の物性を超える優れた創発量子物性の探索と、その応用の開拓を行った。その中心的成果として、細長い擬1次元構造を持つカーボンナノチューブに人工的な欠陥導入を行うことで0次元的な準位を導入した1次元-0次元複合カーボンナノチューブにおいて、低エネルギーの光を吸収し、高エネルギーの光を放出する「アップコンバージョン発光」現象が高い効率で生じることを見出し、そのメカニズムを解明した。

研究成果の概要(英文)：We explored novel emergent quantum properties in complex nanostructures, and exploited their applications. As a major achievement, we discovered that carbon nanotubes with artificially introduced localized exciton states exhibit up-conversion photoluminescence phenomenon efficiently, in which the nanotubes absorb low energy photons and emit high energy photons.

研究分野：ナノ物質科学

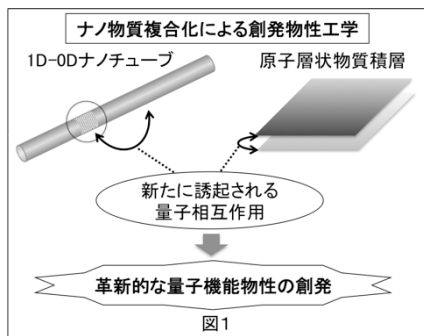
キーワード：カーボンナノチューブ アップコンバージョン発光 励起子 バイオイメージング

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ物質科学の急速な発展により、カーボンナノチューブ、グラフェン、原子層半導体に代表される単原子～数原子層程度の厚みしかない極限ナノ物質が作製可能となりつつある。これらの極限ナノ物質では、従来の半導体ナノ構造では極低温でしか発現しない量子物性が常温でも顕著に発現することから、常温で動作する高機能量子発光素子や高性能発光バイオプローブ、超高効率光・熱エネルギー変換素子、新たな動作原理に基づく省エネルギー電子素子などの画期的な光機能応用の実現が期待されている。

2. 研究の目的

本研究は、カーボンナノチューブ、グラフェン、原子層半導体に代表される極限的に「細い、薄い」ナノ物質の人工的複合化により、ナノ物質固有の物性を凌駕する優れた創発量子物性を発現させ、その応用学理を開拓することを目的として行った(図1)。具体的には、**(A)1次元-0次元複合ナノチューブにおける光機能性の実証**、ならびに**(B)原子層ナノ物質の人工積層構造における新奇創発物性の探索**の2項目について研究を行った。



3. 研究の方法

上記の研究項目(A)、(B)について、それぞれ以下のように研究を進めた。主たる計測技術としては、発光分光法を用いた。
(A)単層カーボンナノチューブ分散液への0D状態の導入→1次元-0次元複合ナノチューブにおける光機能性の探索→上記で見出した光機能性の応用
(B)原子層状物質ヘテロ積層構造の精密作製技術確立→各種ヘテロ積層構造における新奇創発物性の探索

4. 研究成果

(A)の成果: 1次元-0次元複合ナノチューブにおける高効率な近赤外アップコンバージョン発光現象の発見とメカニズム解明

研究項目(A)の主要な成果として、直径0.8nm程度の1次元-0次元複合カーボンナノチューブに、約1100-1200nm程度の長波長(低エネルギー)の光を照射することで、シリコン製のカメラで検出可能な1000nm以下の短波長(高エネルギー)の「アップコンバージョン発光」が比較的効率よく得られることを発

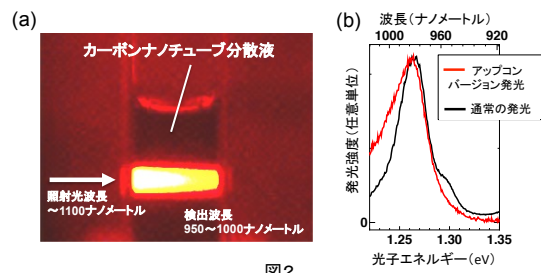


図2

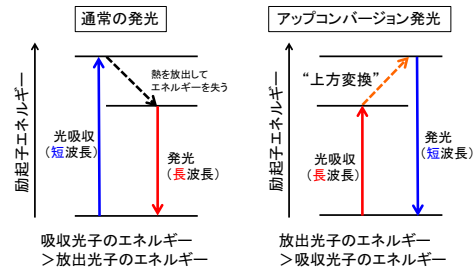


図3

見した[発表論文(11),(18),(20)]。図2(a)に、シリコン製の高感度 CCD カメラで撮影した単層カーボンナノチューブ分散液(ナノチューブには、超音波分散時の欠陥導入により0次元状態が埋め込まれている)のアップコンバージョン発光の様子を示す。照射している光の波長(1100nm)が観測している光波長(950-1000nm)より長いにも関わらず、1000nm以下の発光が明確に観測されていることが分かる。図2(b)に、カーボンナノチューブの通常発光(photoluminescence, PL)のスペクトル(波長570nmの光照射下)と、アップコンバージョン発光(up-conversion photoluminescence, UCPL)(波長1100nmの光照射下)のスペクトルを比較して示す(比較のため、縦軸は規格化している)。どちらも、発光のピークが同じ波長に見られることから、同じ種類のカーボンナノチューブからの発光であると考えられる。さらに、単一カーボンナノチューブの顕微発光分光も行うことで、同一の単一カーボンナノチューブから、通常発光とアップコンバージョン発光の両方が観測され、そのスペクトルが良い一致を見せることも明らかにした[発表論文(18)]。

図3に、通常発光とアップコンバージョン発光の違いを模式的に示す。通常発光過程では、物質内の電子が、照射した短波長の光子のエネルギーを吸収して高いエネルギー状態(励起子状態)に打ち上げられたあと、熱を放出してエネルギーを失い、照射した光子よりも低いエネルギー(長波長)の光子を放出して緩和する。一方、長波長(低エネルギー)の光照射によって短波長(高エネルギー)の発光が得られるアップコンバージョン発光現象は、いわば建物の1階から2階にボールを投げ入れたら、なぜか3階から戻ってくるようなもので、大変特異な現象である。このような発光現象は、希土類元素をドーブしたセラミックスや有機色素などの限られた物質において、それぞれに特有のメカニズムにより、比較的効率よく生じることが知られてい

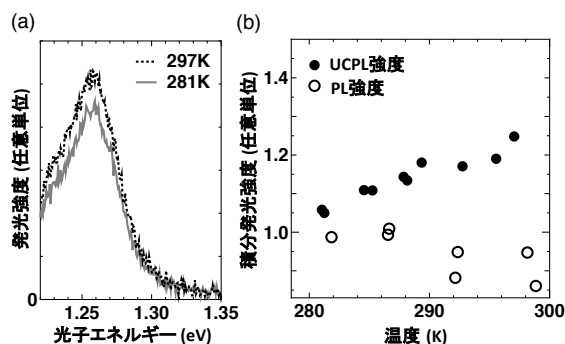


図4

る。詳しい解析の結果、1次元-0次元複合ナノチューブにおいては、以下の①から③の過程により、高効率なアップコンバージョン発光が実現していることがわかった。

①光を吸収して、低いエネルギー状態にある0次元励起子(局在励起子)が生成される。②フォノン吸収(熱励起)によって、励起子がさらに高いエネルギー状態(1次元自由励起子状態)に打ち上げられ、移動する。③1次元自由励起子が、光としてエネルギーを放出し(アップコンバージョン発光)、基底状態に戻る。

上記①の過程が関連していることは、化学的な方法でナノチューブに埋め込まれた0次元状態の密度を増加させると、アップコンバージョン発光も増強されることから確認された。②の過程は、温度を変えながら行った実験の結果(図4(a): 297 Kと281 Kにおける発光スペクトル, 図4(b): UCPLとPL強度の温度依存性)等の詳しい解析から、明らかとなった。②の過程において、1次元状態に打ち上げられた励起子は、素早くナノチューブ軸に沿って拡散的に移動するため、元の低エネルギーの局在励起子状態に戻る確率が低くなっていることが、効率の良いアップコンバージョン発光が可能となっている原因と考えられる。

上記の発見は、カーボンナノチューブの近赤外発光をバイオイメージングに応用する際に、照射する光と観察する発光の波長の長短を「入れ替える」ことを可能にする。従来の研究において、波長1000 nm以下の照射光と、直径1 nm程度のカーボンナノチューブからの波長1100-1400 nm程度の発光を用いることで、近赤外波長領域の光の顕著な生体透過性により、マウスのような実験動物の生体深部臓器の発光イメージングが可能になることが示されていた。しかしながら、従来手法では、1100-1400 nmの近赤外発光を捉えるのに、高価なレアメタル化合物半導体材料で作られた特殊なカメラを準備する必要があり、当該手法の広い普及を妨げる一因となっていた。本研究により、直径0.8 nm程度の細めのカーボンナノチューブに1100 nm程度の光を照射することで、広く普及しているシリコン製のCCDカメラで十分捉えることができる1000 nm以下の発光(アップコンバージョン発光)が得られることが分かった。この場合も、照射光と発光の波長は、両方とも生体内部の発光イメージングに適した近赤外波長領域内に

ある。さらに、アップコンバージョン発光を用いたイメージングでは、カーボンナノチューブ以外の物質は光をほとんど生じないため、通常の発光イメージングで問題となる自家蛍光に邪魔される事のない、クリアな発光イメージが得られるという利点がある。そこで、本研究の後半では、この利点を生かしたアップコンバージョン発光現象の深部組織バイオイメージング応用の研究を進めた。本成果は、カーボンナノチューブの新たな興味深い光物性の発見という基礎科学的な意義に加えて、カーボンナノチューブを用いた生体発光イメージングや生体埋込型光バイオセンサーが、これまでよりも身近に、多くの場面で手軽に利用できるようになることに繋がるものと期待される。

(B)の成果：原子層物質ヘテロ積層構造における層間励起子物性の解明

本研究では、原子層物質のヘテロ構造として、 $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$ を作製し、その基礎光物性を調べることで、積層によって誘起される新奇創発物性の探索を行った。その主要な成果として、電子と正孔がそれぞれ異なる層に局在する層間励起子に起因する発光ピークの出現を観測し、層間励起子発光の温度依存性から、層間励起子結合エネルギーが90 meV程度と見積もられた[発表論文(5)]。この成果は、2種類の異なる原子層物質をただ重ね合わせるだけで、層間相互作用によって新しい物性が創発することを示すものである。今後、これらの新しい創発物性を生かした新たな動作原理に基づく省エネルギー電子素子などへの応用展開が期待される。

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] (計21件)

・査読有(21件)

(1)Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, K. Matsuda, "Evidence for line width and carrier screening effects on excitonic valley relaxation in 2D semiconductors", Nat. Commun., in press.

(2)M-Y. Li, J. Pu, J-K. Huang, Y. Miyauchi, K. Matsuda, T. Takenobu, and L-J Li, "Self-aligned and scalable growth of monolayer WSe_2 - MoS_2 lateral heterojunctions", Adv. Func. Mat. 1706860(1-7) (2018). DOI: 10.1002/adfm.201706860

(3)N. B. Mohamed, H. E. Lim, F. Wang, S. Koirala, S. Mouri, K. Shinokita, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, "Long radiative lifetimes of excitons in monolayer transition-metal dichalcogenides MX_2 ($M = \text{Mo}, \text{W}$; $X = \text{S}, \text{Se}$)", Appl. Phys. Exp. 11, 015201 (2018). DOI: 10.7567/APEX.11.015201

(4)D. Tan, W. Zhang, X. Wang, K. Sandhaya, Y.

- Miyauchi, and K. Matsuda, “Polarization-sensitive and broadband germanium sulfide photodetectors with excellent high-temperature performance”, *Nanoscale* 9, 12425-12431 (2017). DOI: 10.1039/C7NR03040A
- (5) S. Mouri, W. Zhang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, G. Eda and K. Matsuda, “Thermal dissociation of inter-layer excitons in MoS₂/MoSe₂ heterobilayers” *Nanoscale* 9, 6674-6679 (2017). DOI: 10.1039/C7NR01598D
- (6) F. Wang, A. Shimazaki, Ai, F. Yang, K. Kanahashi, K. Matsuki, Y. Miyauchi, T. Takenobu, A. Wakamiya, Y. Murata, and K. Matsuda, “Highly efficient and stable perovskite solar cells by interfacial engineering using solution-processed polymer layer”, *J. Phys. Chem. C* 121, 1562-1568 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b12137
- (7) M. Okada, Y. Miyauchi, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Shinohara and R. Kitaura, “Observation of biexcitonic emission at extremely low power density in tungsten disulfide atomic layers grown on hexagonal boron nitride”, *Sci Rep.* 7, 322 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-00068-0
- (8) N. Baizura Mohamed, F. Wang, H. En Lim, W. Zhang, S. Koirala, S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, “Evaluation of photoluminescence quantum yield of monolayer WSe₂ using reference dye of 3-borylbithiophene derivative”, *Phys. Status. Solidi. B* 254, 1600563 (2017). DOI: 10.1002/pssb.201600563
- (9) K. Maeda, Liu Hong, T. Nishihara, Y. Nakanishi, Y. Miyauchi, R. Kitaura, N. Ousaka, E. Yashima, H. Ito, and K. Itami, “Construction of covalent organic nanotubes by light-induced cross-linking of diacetylene-based helical polymers”, *J. Am. Chem. Soc.* 138, 11001-11008 (2016). DOI:10.1021/jacs.6b05582.
- (10) S. Sasaki, Y. Kobayashi, Z. Liu, K. Suenaga, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, Y. Miyata, “Growth and optical properties of Nb-doped WS₂ monolayers”, *Appl. Phys. Express*, 9, 071201-1-071201-4 (2016). DOI:10.7567/APEX.9.071201
- (11) Y. Maeda, S. Minami, Y. Takehana, J. Dang, S. Aota, K. Matsuda, Y. Miyauchi, M. Yamada, M. Suzuki, R-S. Zhao, X. Zhao, and S. Nagase, “Tuning of photoluminescence and up-conversion photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes by chemical functionalization”, *Nanoscale* 8, 16916-16921 (2016). DOI: 10.1039/C6NR04214G
- (12) F. Wang, A. Shimazaki, Ai, F. Yang, K. Kanahashi, K. Matsuki, Y. Miyauchi, T. Takenobu, A. Wakamiya, Y. Murata, and K. Matsuda, “Highly efficient and stable perovskite solar cells by interfacial engineering using solution-processed polymer layer”, *J. Phys. Chem. C* 121, 1562-1568 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b12137
- (13) D. Kozawa, A. Carvalho, I. Verzhbitskiy, F. Giustignano, Y. Miyauchi, S. Mouri, A. H. Castro Neto, K. Matsuda, and G. Eda, “Evidence for fast interlayer energy transfer in MoSe₂/WS₂ heterostructures”, *Nano Lett.* 16, 4087-4093 (2016). DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b00801.
- (14) X. Wei, T. Tanaka, N. Akizuki, Y. Miyauchi, K. Matsuda, M. Ohfuchi, and H. Kataura, “Single-chirality separation and optical properties of (5,4) single-wall carbon nanotubes”, *J. Phys. Chem. C* 120, 10705-10710 (2016). DOI: 10705-10710. 10.1021/acs.jpcc.6b03257
- (15) S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, “Chemical doping modulation of nonlinear photoluminescence properties in monolayer MoS₂”, *Appl. Phys. Exp.* 9, (2016) 055202. DOI: 10.7567/APEX.9.055202
- (16) S. Koirala, S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, “Homogeneous linewidth broadening and exciton dephasing mechanism in MoTe₂”, *Phys. Rev. B* 93, 075411-1-075411-5 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.075411
- (17) Q. Wang, R. Kitaura, S. Suzuki, Y. Miyauchi, K. Matsuda, Y. Yamamoto, S. Arai, and H. Shinohara, “Fabrication and in-situ TEM characterization of freestanding graphene nanoribbon device”, *ACS Nano* 10, 1475-1480 (2016). 10.1021/acsnano.5b06975
- (18) S. Aota, N. Akizuki, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, “Upconversion photoluminescence imaging and spectroscopy of individual single-walled carbon nanotubes”, *Appl. Phys. Express* 9, 045103-1-045103-4 (2016). DOI:10.7567/APEX.9.045103
- (19) Y. Tsuboi, F. Wang, D. Kozawa, K. Funahashi, S. Mouri, Y. Miyauchi, T. Takenobu and K. Matsuda, “Enhanced photovoltaic performances of graphene/Si solar cells by insertion of MoS₂ thin film”, *Nanoscale* 7, 14476-14482 (2015). DOI: 10.1039/C5NR03046C
- (20) N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, “Efficient near-infrared up-conversion photoluminescence in carbon nanotubes”, *Nat. Commun.* 6, 8920-1-8920-6 (2015). DOI: 10.1038/ncomms9920
- (21) Y. Miyauchi, Z. Zhang, M. Takekoshi, Y. Tomio, H. Suzuura, V. Perebeinos, V. V. Deshpande, C. Lu, S. Berciaud, P. Kim, J. Hone, and T. F. Heinz, “Tunable electronic correlation effects in nanotube-light interactions”, *Phys. Rev. B* 92, 205407 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.205407

・ 査読無（解説記事等）（3件）

- (1) 宮内雄平, “カーボンナノチューブの新しい光機能「アップコンバージョン発光」の発見”, 『OplusE』, アドコム・メディア, vol. 38, No. 5 (通巻 438 号), pp. 409-410, (2016).
- (2) 宮内雄平, “カーボンナノチューブの新たな光機能”, 『化学』, 化学同人, vol. 71, No. 5, pp. 19-23, (2016).
- (3) 宮内雄平, “単層カーボンナノチューブのア

アップコンバージョン発光”, 『機能材料』, シーエムシー出版, vol. 36, No. 4 (通巻 416 号), pp. 49-57, (2016).

〔学会発表〕 (計 32 件)

・招待講演 (13 件)

(1)宮内雄平, “原子層物質の励起子バレー緩和”, 産業技術総合研究所 CUPAL ワークショップ, 東京理科大学 森戸記念館, 2017 年 12 月 20 日.

(2)Y. Miyauchi, “Linewidth and carrier screening effects on exciton valley relaxation in monolayer transition metal dichalcogenides”, The 3rd International Conference on 2D Materials and Technology (ICON-2DMAT 2017), Nanyang Technological University, Singapore, December 11-15, 2017.

(3)宮内雄平, “原子層物質のバレー励起子光物性”, 応用物理学会応用電子物性分科会 研究例会-二次元層状物質研究の最前線-, 東京工業大学 EEI 棟 1F 多目的ホール, 2017 年 10 月 19 日.

(4)Y. Miyauchi, “Up-conversion photoluminescence of CNTs and its enhancement by defect engineering”, Defect Chemistry and Physics of Low Dimensional Materials (TSRC workshop), Telluride Intermediate School, Colorado, USA, July 11-15, 2017.

(5)宮内雄平, “低次元ナノ物質の光物性工学とその応用”, 第 24 回京都大学宇治キャンパス産学交流会 (京都大学・京都大学宇治キャンパス産学交流企業連絡会・京都府中小企業技術センター・(公財) 京都産業 21), 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 6 月 28 日.

(6)宮内雄平, “単層カーボンナノチューブの励起子光物性とその応用”, 2016 年度第 2 回ナノカーボン研究会 ((公財) 新世代研究所), 野地温泉ホテル, 福島, 2017 年 1 月 16 日-17 日.

(7)宮内雄平, “カーボンナノチューブの近赤外アップコンバージョン発光とその応用”, 日本分光学会近赤外分光部会 第 12 回 シンポジウム, 近畿大学, 2016 年 12 月 22 日.

(8)宮内雄平, “カーボンナノチューブの新たな光機能”, 平成 28 年度第 2 回カーボンナノ材料研究会, (一財) 大阪科学技術センター, 大阪科学技術センター, 2016 年 11 月 21 日.

(9)宮内雄平, “カーボンナノチューブの近赤外アップコンバージョン発光”, 新化学技術推進協会(JACI) 電子情報技術部会・エレクトロニクス交流会応用技術企画 WG 講演会「アップコンバージョンの最新技術」, 新化学技術推進協会 会議室, 2016 年 6 月 6 日.

(10)宮内雄平, “カーボンナノチューブにおける励起子の物理と工学”, 第 50 回 フラワーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール, 2016 年 2 月 22 日.

(11)宮内雄平, “カーボンナノチューブの光物性工学”, 東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門ワークショップ 2015, 東京理科

大学神楽坂キャンパス, 2016 年 1 月 13 日.

(12)Y. Miyauchi, “Emergent optical phenomena in carbon nanotubes”, The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Hawaii, USA, Dec. 19, 2015.

(13)宮内雄平, “ナノカーボン・原子層物質の光機能”, 第 19 回 VBL シンポジウム「有機ナノ電子デバイスの物理と化学」, 名古屋大学フロンティアプラザ, 名古屋大学工学研究科・ベンチャービジネスラボラトリー, 2015 年 11 月 9 日.

・口頭・ポスター発表

(14)M. Shimasaki, W. Zhang, X. Wang, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Photoluminescence properties of twisted bilayer transition metal dichalcogenides”, 第 54 回フラワーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール, 3 月 10 日-12 日, 2018.

(15)K. Hachiya, S. Okudaira, Y. Konno, Y. Maeda, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Near-infrared luminescence thermometric imaging using carbon nanotubes”, 第 54 回フラワーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール, 3 月 10 日-12 日, 2018.

(16) W. Zhang, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Photoluminescence properties of monolayer MoS₂ in an aqueous solution”, APS March Meeting 2018, Los Angeles, CA, USA, March 5-9, 2018.

(17) S. Okudaira, Y. Iizumi, M. Yudasaka, T. Okazaki, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Near-infrared up-conversion photoluminescence imaging of carbon nanotubes in mice tissues”, JSAP-OSA Joint Symposia 2017, Fukuoka International Congress Center, Sept. 5-8, 2017.

(18) S. Okudaira, Y. Iizumi, M. Yudasaka, T. Okazaki, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Up-conversion photoluminescence imaging and spectroscopy of carbon nanotubes in mice tissues”, 第 7 回ナノカーボンバイオシンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 9 月 12 日.

(19)W. Zhang, A. Hwang, T. Saito, K. Kobayashi, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. Miyata, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Substrate and sample dependent exciton transport properties in monolayer transition metal dichalcogenides”, 第 53 回フラワーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 9 月 13 日-15 日.

(20) 八谷健吾, 奥平早紀, 紺野優以, 前田優, 松田一成, 宮内雄平, “カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光を用いた近赤外領域の光温度計測”, 第 53 回フラワーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 9 月 13 日-15 日.

(21) 奥平早紀, 飯泉陽子, 岡崎俊也, 松田一

成, 宮内雄平, “カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光を用いた広視野イメージングの分解能評価”, 第53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, 京都大学宇治キャンパス, 2017年9月13日-15日.

(22) 宮内雄平, 小鍋哲, 王飛久, 長谷川勇介, 毛利真一郎, 松田一成, “単層 WSe₂ における励起子バレー分極の緩和機構”, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017年3月17日-20日.

(23) W. Zhang, Y. Hasegawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Optical spectroscopy on monolayer transition metal dichalcogenides immersed in an aqueous solution”, 第52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, 東京大学伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール, 2017年3月1日-3日.

(24) S. Okudaira, M. Yudasaka, Y. Iizumi, T. Okazaki, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Upconversion photoluminescence spectra of carbon nanotubes in mice tissues”, 第52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, 東京大学伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール, 2017年3月1日-3日.

(25) W. Zhang, Y. Hasegawa, S. Mouri, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Polarization-resolved photoluminescence spectroscopy on monolayer transition metal dichalcogenides under electrostatic gating”, 第51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, 北海道立道民活動センター かでる2・7, 2016年9月7日-9日.

(26) Y. Hasegawa, S. Mouri, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Valley polarization mapping in transition metal dichalcogenides heterostructures”, 第51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, 北海道立道民活動センター かでる2・7, 2016年9月7日-9日.

(27) S. Okudaira, M. Yudasaka, Y. Iizumi, T. Okazaki, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Upconversion photoluminescence imaging of carbon nanotubes in mice tissues”, 第51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, 北海道立道民活動センター かでる2・7, 2016年9月7日-9日.

(28) 長谷川勇介, 王飛久, 青田駿, 毛利真一郎, 松田一成, 宮内雄平, “単層遷移金属ダイカルコゲナイドの偏光分解発光マッピング”, 第50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, 東京大学伊藤国際学術研究センター, 伊藤謝恩ホール, 2016年2月20日-22日.

(29) 青田駿, 秋月直人, 毛利真一郎, 松田一成, 宮内雄平, “単層カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光”, 第26回光物性研究会, 神戸大学百年記念会館, 2015年12月11日-12日.

(30) S. Aota, N. Akizuki, Y. Ogawa, S. Mouri, K. Matsuda, Y. Miyauchi, “Upconversion

photoluminescence properties of individual single-walled carbon nanotubes”, The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), Nagoya University, Nagoya, Japan, June 29-July 3, 2015.

(31) Y. Miyauchi, N. Akizuki, S. Mouri, K. Matsuda, “Observation of efficient upconversion photoluminescence of carbon nanotubes under one-photon excitation conditions”, WONTON'15 (6th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy), Kloster Banz, Germany, June 1-4, 2015.

(32) Y. Miyauchi, K. Matsuda, “Observation of Efficient Upconversion Photoluminescence of Single-Walled Carbon Nanotubes”, 227th ECS Meeting, Chicago, Illinois, California, USA, May 24-28, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

[http://www.iae.kyoto-](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/miyauchi/indexj.html)

[u.ac.jp/conv/miyauchi/indexj.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/miyauchi/indexj.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮内 雄平 (MIYAUCHI, Yuhei)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号: 10451791