

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24681031

研究課題名(和文)革新的光電デバイス応用に向けたカーボンナノチューブ量子多体効果の学理の開拓

研究課題名(英文)Studies on many-body correlation effects in carbon nanotubes for developing novel optoelectronic devices

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) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：カーボンナノチューブにおける量子多体相互作用の解明のため、単一架橋カーボンナノチューブの光励起・キャリアドープ条件下でのレイリー散乱分光を実現した。その結果、電界キャリアドープ条件下において、励起子共鳴エネルギーの大幅なシフトと線幅の大幅なブロードニングを観測した。これらの結果は、僅かなキャリアドープによって可視光領域の光学スペクトルを著しく変調できることを示すもので、基礎的な意義とともに、光・電子デバイス応用の新たな可能性を示すものである。さらに、ナノチューブ上の励起子次元性と光物性の相関について研究し、励起子次元性変換による著しい発光増強を見だし、そのメカニズム解明を行った。

研究成果の概要(英文)：Electronic many-body correlation effects in carbon nanotubes were studied by observing broadband Rayleigh scattering from individual suspended carbon nanotubes under electrostatic gating conditions. We found significant shifts in optical transition energies, as well as line broadening, as the carrier density is increased. The observed tunability of the optical resonance could be useful for applications in future optoelectronic devices. We also found brightening of excitons (bound electron-hole pairs) in carbon nanotubes through an artificial modification of their effective dimensionality from 1D to 0D. It was revealed that the luminescence quantum yield of the excitons confined in the 0D-like states can be more than at least one order larger than that of the intrinsic 1D excitons, not only because of the reduced non-radiative decay pathways but also owing to an enhanced radiative recombination probability beyond that of intrinsic 1D excitons.

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 光物性 レイリー散乱 キャリアドープ

### 1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブは、グラフェンを直径1ナノメートル程度の円筒状に丸めた構造を持つ擬1次元量子細線である。グラフェンの丸めかた(カイラリティ)によって金属にも半導体にもなる特異な性質や、その1次元性を反映した特徴的な電子・光物性により、低次元物性物理研究の新たなプラットフォーム、ならびに次世代光・電子デバイス材料として大きな注目を集めている。半導体型のナノチューブにおいては、光励起により生成された電子正孔対が0.1-1eV程度の大きな結合エネルギーを持つ励起子を形成し、室温においても1次元励起子ダイナミクスを色濃く反映した様々な光物性・光機能が発現する。顕著な量子効果を発現するこのような低次元量子ナノ構造では一体どのような新奇物理現象が起こるのか?この間に答えることは自然科学として重要なだけでなく、これらの新物質群なくしては実現できない革新的応用技術を開拓する上で非常に大きな意義を持つ。上記のような背景のもと、申請者は研究開始時までに、単層カーボンナノチューブの高純度合成法(アルコールCVD法)の開発、単層カーボンナノチューブの1次元励起子光物性の解明などの重要な成果を得ていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、理想的な1次元量子ナノ構造である単層カーボンナノチューブの光物性・光機能を単一ナノチューブの根源的レベルから解明し、その応用学理を開拓することを目的とした。特に、基礎科学的な意義に加え、カーボンナノチューブの光・電子デバイス応用上も重要な光励起・キャリアドープ条件下の量子多体相互作用プロセスを解明することを目指した。上記目的の達成のため、1次元電子ガスの光物性物理の解明のためのキャリアドープ条件下単一ナノチューブ光学測定手法の開発、1次元系における量子多体効果の解明、ナノチューブ上の励起子次元性・光物性相関の解明、それらに基づく革新的光・電子デバイス応用学理の開拓を目指して研究を開始した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 単一架橋カーボンナノチューブのキャリアドープ条件下のレイリー散乱分光

研究の開始時点において、電気化学手法やドーパント分子の吸着を用いてキャリアドープしたカーボンナノチューブのアンサンブル試料を用いて、我々のグループを含む国内外の研究グループにより、正負荷電励起子の発光や、緩和ダイナミクスの観測がなされていた。しかしながら、キャリアドープによる著しい非輻射緩和の増大や、キャリア濃度の空間的不均一性、キャリア濃度見積の困難等、バルク試料の発光測定とそこから得られる情報には様々な制約がある。

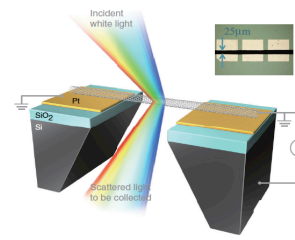


図1 単一ナノチューブデバイスの模式図。挿入図は実際のデバイスの光学顕微鏡写真。

そこで我々は、単一ナノチューブを直径の数万倍程度の距離にわたって空中を橋渡し(架橋)するように合成し、かつカイラリティを光学的に決定し、その両端を電極につなぐことで直接キャリアドープを行い、電荷密度も決定した上で光学測定を行うことが可能な単一カーボンナノチューブデバイス(図1)を作製し、誘電関数を直接的に反映するレイリー散乱スペクトルの電界ドープ条件下における測定を行った。本研究では特に、第1サブバンドにキャリアドープした条件下で、第3、第4サブバンドといった高次のサブバンドにおける励起子遷移を観測することで、電子-電子(または電子-正孔)間の多体相互作用の変調による効果と、キャリアドープによるパウリブロッキングの効果とを完全に切り分けて捉えることを可能とした。

#### (2) カーボンナノチューブにおける励起子次元性の変換

本研究項目では、カーボンナノチューブ上の励起子次元性と光物性の相関を調べるため、以下の方法でナノチューブ量子細線上に局所擬0次元状態を制御して作製することを試みた。擬0次元状態導入には、カーボンナノチューブ壁への酸素原子ドープにより、局所的にバンドギャップが変調される現象を利用した。このような現象がオゾンとの反応や紫外線照射により生じることは以前から知られていたが、本研究では、実験手順やナノチューブの分散方法、反応条件等を最適化することで、カーボンナノチューブ固有の1次元部分を傷つけずに保ったまま、カーボンナノチューブ1本あたり(炭素原子数万個あたり)1個程度の非常に希薄な割合に制御して発光性の擬0次元局所状態を作製することを可能にした。

### 4. 研究成果

#### (1) 単一架橋カーボンナノチューブにおける光励起・キャリアドープ条件下の量子多体相互作用の解明

図2に、電界キャリアドープ条件下において観測されたレイリー散乱スペクトルの変化を示す。ここでは負のゲート電圧に対応する結果を示しているが、正のゲート電圧についても、ほぼ同様の結果を得ている。ゲート電圧を印可し、キャリア密度を増加させると、励起子エネルギーは低エネルギーシフトを

示し、励起子共鳴ピークの線幅が著しく増加することが観測された。このことは、直接キャリアドーピングされていない高次サブバンドの励起子が、第1サブバンドにドーピングされたキャリアとの多体相互作用の影響を顕著に受けることを示しており、カーボンナノチューブにおける特異な量子多体相互作用を反映したものと考えられる。

図3(a)に、図2の実験結果から得られた高次サブバンド励起子エネルギーのシフトと、キャリア密度との関係を示す。励起子エネルギーのシフトは、キャリア密度が小さい領域で急激な変化を示し、キャリア密度が大きくなると、おおよそ $\rho$ の0.6乗に比例する振る舞いを示すことが分かった。

次に、観測された励起子エネルギーシフトの起源を探るため、励起子エネルギーのキャリア密度依存性についての $kp$ 近似による理論計算の結果と実験結果の比較を行った(図3(b))。理論計算においては、電子-正孔間の引力相互作用による励起子結合エネルギーの変化の寄与(図3(b)の青線、 $\Delta E_b$ ) (励起子結合エネルギーが減少すると、励起子共鳴エネルギーは高エネルギーシフトする)と、電子の自己エネルギーによるバンドギャップリノーマリゼーションの寄与(図3(b)の緑線、 $\Delta\Sigma$ ) (自己エネルギーが減少すると、励起子共鳴エネルギーは低エネルギーシフトする)を別々に計算している。その結果、ドーピングされたキャリアにより、電子-電子、電子-正孔間の相互作用が共に遮蔽されるこ

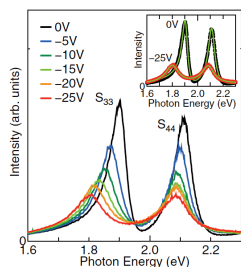


図2 ゲート電圧印可下(電界キャリアドーピング)における半導体カーボンナノチューブの $S_{33}$ ,  $S_{44}$ 励起子共鳴ピーク周辺のレイリー散乱スペクトル。挿入図は、ゲート電圧0Vと-25Vにおいて観測されたスペクトルそれぞれについてのモデル関数を用いたフィッティング結果。

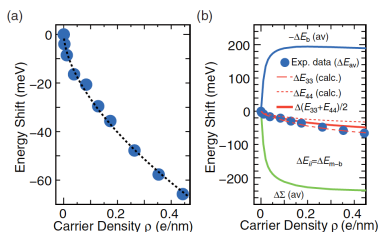


図3 (a)励起子エネルギーシフト量のキャリア密度 $\rho$ への依存性。点線は、 $\rho^{0.6}$ に比例する曲線。(b)理論計算との比較。実験の励起子共鳴エネルギー(青丸)は、電界ドーピング時のひずみの影響を除去するため、 $S_{33}$ 励起子と $S_{44}$ 励起子の共鳴エネルギーシフトの平均値をプロットしている。

とで、励起子結合エネルギーと自己エネルギーの両方が著しく減少すること、またそれらの寄与の符号が逆であり、自己エネルギーの減少量のほうが励起子エネルギーの減少量を若干上回るため、最終的に得られる励起子共鳴エネルギーは、上記2つの効果が相殺されることで比較的緩やかな低エネルギーシフトを示すことが示された。図3(b)に示すように、理論計算から予測される励起子共鳴エネルギーの変化は実験結果を良く再現している。

本研究によって明らかとなったこれら数々の知見は、僅かなキャリアドーピングによって、バンドギャップよりもはるかに高エネルギーの可視光領域の光学スペクトルを著しく変調することが出来ることを示すもので、基礎的な意義と共に、カーボンナノチューブベースのオプトエレクトロニクスデバイス応用の新たな可能性を示すものである。

## (2)カーボンナノチューブにおける励起子次元性の変換による発光増強の解明

半導体型ナノチューブは近赤外領域で発光するため、将来のナノサイズの光ファイバ通信用省エネルギー光源や高感度な光検出器等への光・電子デバイス応用が期待されているが、通常、励起子発光量子効率非常に低いこと(約1%程度)から、その応用に向けて高い発光効率の達成が強く求められていた。近年の研究により、この低い発光効率は、主として固有の擬1次元励起子がカーボンナノチューブ上を素早く拡散的に動きまわり意図せずに形成された端や欠陥などの非発光中心に衝突することですばやく非輻射緩和してしまうことに起因することが明らかとなっている。では、励起子発光によってより良い局所状態、すなわち、励起子が非輻射緩和でエネルギーを失うことなくそこに留まれるような、発光性の擬0次元局所状態をナノチューブ量子細線上に人工的に作製したら、励起子ダイナミクスはどのように変化するだろうか?図4(a)に、そのような擬0次元状態が埋め込まれたカーボンナノチューブ量子細線の概念図を示す。図4(a)に示すように、0次元状態における励起子エネルギーが1次元状態よりも十分に安定なら、励起子はその部分に捉えられて、欠陥などとの衝突による非輻射緩和が抑制できると期待される。そこで本研究では、そのような0次元状態を極めてまばらに有するカーボンナノチューブを実際に作製し、その光物性を詳細に検討した。

図4(b)に、擬0次元状態を導入する前後での、カーボンナノチューブからの発光スペクトルの変化を示す。酸素ドーピングにより、1.07 eV付近に擬0次元状態の導入に起因する巨大な発光ピークが出現している。

図5に、カーボンナノチューブ上の局所擬0次元発光サイト数の増減に伴う、擬0次元状態からの発光強度(縦軸)と、細線部分か



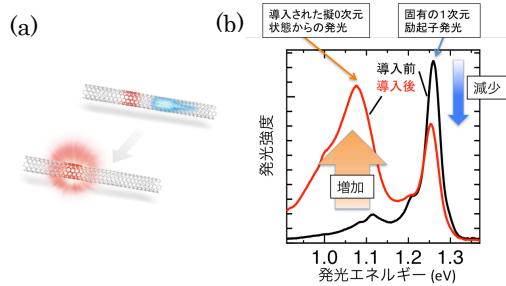


図 4 (a)局所擬 0 次元状態を導入したカーボンナノチューブと、ナノチューブ固有の 1 次元部分の上を移動する励起子と擬 0 次元状態に励起子が捉えられて明るく発光する様子の模式図. (b)局所擬 0 次元状態導入前後での発光スペクトルの比較.

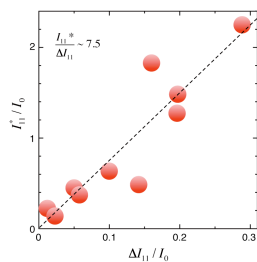


図 5 カーボンナノチューブ固有の細線部分からの発光強度減少量 (横軸) と、量子ドット部分からの発光強度増加量 (縦軸) の相関関係のプロット.

らの発光強度の減少量 (横軸) の関係を示す。ここで、 $I_{11}^*$  は擬 0 次元状態からの発光の強度、 $\Delta I_{11}$  は細線部分からの発光強度の減少量、 $I_0$  は、局所状態導入前の固有ピーク強度である。図 5 に示すように、2 つの量には明確な相関関係があることがわかった。まばらな 0 次元状態を有する 1 次元系における励起子の拡散的移動と局所状態でのトラップ、発光に至る一連の過程を考慮すると、図 5 の比例関係における直線の傾きは、細線上の固有の励起子とドットに閉じ込められた励起子の発光の効率の比に比例し、以下の関係に従うことを示すことができる。

$$\frac{I_{11}^*}{\Delta I_{11}} \leq \frac{1}{2} \left( \frac{\eta^*}{\eta_0} \right) \left( \frac{E_{11}^*}{E_{11}} \right)$$

ここで、 $\eta^*$  は擬 0 次元状態の発光量子効率、 $\eta_0$  は固有の 1 次元状態の発光量子効率、 $E_{11}^*$ 、 $E_{11}$  はそれぞれ擬 0 次元状態と固有の 1 次元状態における励起子エネルギーを表す。この関係から、擬 0 次元の励起子の発光量子効率は、細線上の励起子 (約 1%) の少なくとも約 18 倍 (約 18%) 以上であることが明らかとなった。なお、この桁違いの発光量子効率増大のメカニズムについては、時間分解発光測定と温度依存発光測定によりより詳しい検討を行っており、擬 0 次元状態における約 18 倍の発光増強は、1) 非輻射緩和が抑制されて励起子寿命が約 6 倍に延びたこと、および、2) 擬 0 次元状態における励起子の輻射緩和レ-

トが、固有の 1 次元状態の約 3 倍程度に増強されたこと、の相乗効果に由来することを見いだしている。前者の効果は、固有の 1 次元励起子の主要な非輻射緩和過程である欠陥との衝突の抑制に起因すると考えられる。一方、後者の効果は、励起子が擬 0 次元状態に閉じ込められることで、その次元性とサイズそのものが変化し、1 次元量子細線としてのナノチューブ固有の限界を超えて発光の効率が高められることを示すものである。

今後このような 0 次元-1 次元ハイブリッド材料を舞台に、異なる次元性を持つ電子状態の間の相互作用が生み出す、様々な未知の創発現象を探っていくことができると考えられる。また、カーボンナノチューブの発光効率をさらに高めることができれば、ナノカーボンベースの高効率近赤外発光デバイスなどの新しい光機能素子の実現に繋がると期待される。

## 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 23 件)

[1] S. Aota, N. Akizuki, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, Appl. Phys. Express 9, 045103-1-045103-4 (2016). DOI:10.7567/APEX.9.045103, 査読有.

[2] 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, 査読有.

[3] 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, 査読有.

[4] 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, 査読有.

[5] 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, 査読有.

[6] 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, 査読有.

[7] F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, and K. Matsuda, “Considerably improved photovoltaic

performance of carbon nanotube-based solar cells using metal oxide layers”, *Nat. Commun.* 6, 6305-1-6305-7 (2015). DOI: 10.1038/ncomms7305, 査読有.

[8]M. Iwamura, N. Akizuki, Y. Miyauchi, S. Mouri, J. Shaver, Z. Gao, L. Cognet, B. Lounis, and K. Matsuda, “Nonlinear photoluminescence spectroscopy of carbon nanotubes with localized exciton states”, *ACS Nano* 8, 11254-11260 (2014). DOI: 10.1021/nn503803b, 査読有.

[9]S. Mouri, Y. Miyauchi, M. Toh, W. Zhao, G. Eda, and K. Matsuda, “Nonlinear photoluminescence in atomically thin layered WSe<sub>2</sub> arising from diffusion-assisted exciton–exciton annihilation”, *Phys. Rev. B* 90, 155449-1-155449-5 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.155449, 査読有.

[10]N. Fuyuno, D. Kozawa, Y. Miyauchi, S. Mouri, R. Kitaura, H. Shinohara, T. Yasuda, N. Komatsu, and K. Matsuda, “Drastic change in photoluminescence properties of graphene quantum dots by chromatographic separation”, *Adv. Opt. Mat.* 2, 983-989 (2014). DOI: 10.1002/adom.201400200, 査読有.

[11]L. Hong, S. Mouri, Y. Miyauchi, K. Matsuda, N. Nakashima, “Redox properties of a single (7,5) single-walled carbon nanotube determined by in situ photoluminescence spectroelectrochemical method”, *Nanoscale*, 6, 12798-12804 (2014). DOI: 10.1039/C4NR03945A, 査読有.

[12]S. Zhao, T. Kitagawa, Y. Miyauchi, K. Matsuda, H. Shinohara, R. Kitaura, “Rayleigh scattering studies on inter-layer interactions in structure-defined individual double-wall carbon nanotubes”, *Nano Res.*, 7, 1548-1555 (2014). DOI: 10.1039/C4NR03945A, 査読有.

[13]D. Kozawa, X. Zhu, Y. Miyauchi, S. Mouri, M. Ichida, H. Su, K. Matsuda, “Excitonic photoluminescence from nanodisc states in graphene oxides”, *J. Phys. Chem. Lett.* 5, 1754-1759 (2014). DOI: 10.1021/jz500516u, 査読有.

[14]N. Akizuki, M. Iwamura, S. Mouri, Y. Miyauchi, T. Kawasaki, H. Watanabe, T. Suemoto, K. Wanatabe, K. Asano, and K. Matsuda, “Nonlinear photoluminescence properties of trions in hole-doped single-walled carbon nanotubes”, *Phys. Rev. B* 89, 195432-1-195432-4 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.89.195432, 査読有.

[15]F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, and K. Matsuda, “Fabrication of single-walled carbon nanotube/Si heterojunction solar cells with high photovoltaic conversion performance”, *ACS Photonics* 1, 360-364 (2014). DOI: 10.1021/ph400133k, 査読有.

[16]Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, Kawazoe, T., Ohtsu, M. and K. Matsuda,

“Brightening of Excitons in Carbon Nanotubes on Dimensionality Modification”, *Nat. Photonics* 7, 715-719 (2013). DOI: 10.1038/nphoton.2013.179, 査読有.

[17]S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, “Tunable Photoluminescence of Monolayer MoS<sub>2</sub> via Chemical Doping”, *Nano Lett.* 13, 5944-5948 (2013). DOI: 10.1021/nl403036h, 査読有.

[18]Y. Hirana, G. Juhasz, Y. Miyauchi, S. Mouri, K. Matsuda and N. Nakashima, “Empirical Prediction of Electronic Potentials of Single-Walled Carbon Nanotubes With a Specific Chirality (n,m)”, *Sci. Rep.* 3, 2959-1-2959-6 (2013). DOI: 10.1038/srep02959, 査読有.

[19]F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri and K. Matsuda, “Enhancement Mechanism of the Photovoltaic Conversion Efficiency of Single-Walled Carbon Nanotube/Si Solar Cells by HNO<sub>3</sub> Doping”, *Appl. Phys. Express.* 6, 102301-1-102301-4 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.102301, 査読有.

[20]D. Kozawa, Y. Miyauchi, S. Mouri and K. Matsuda, “Exploring the Origin of Blue and Ultraviolet Fluorescence in Graphene Oxide”, *J. Phys. Chem. Lett.* 4, 2035-2040 (2013). DOI: 10.1021/jz400930f

[21]B. Thendie, Y. Miyata, R. Kitaura, Y. Miyauchi, K. Matsuda and H. Shinohara “Rapid Single-Stage Separation of Micrometer-Long and High-Purity Semiconducting Carbon Nanotubes by Gel Filtration”, *Appl. Phys. Express* 6, 065101-1-065101-4 (2013). DOI: 10.7567/APEX.6.065101, 査読有.

[22]R. Xiang, B. Hou, E. Einarsson, P. Zhao, S. Harish, K. Morimoto, Y. Miyauchi, S. Chiashi, Z. Tang, and S. Maruyama, “Carbon Atoms in Ethanol Do Not Contribute Equally to Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes”, *ACS Nano* 7, 3095-3103 (2013). DOI: 10.1021/nn305180g, 査読有.

[23]S. Mouri, Y. Miyauchi, M. Iwamura and K. Matsuda, “Temperature dependence of photoluminescence spectra in hole-doped single-walled carbon nanotubes: Implications of trion localization”, *Phys. Rev. B* 87, 045408-1-045408-4 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.045408, 査読有.

〔学会発表〕 (計 17 件)

[1] 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 フラレーン・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.

[2] 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.

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

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 宮内雄平, “キャリアドーピングしたカーボンナノチューブにおける励起子光物性”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015 年 3 月 22 日.

[8] Y. Miyauchi, K. Matsuda, “Physics of local quantum states in carbon nanotubes for photonic applications”, Active Photonic Materials VI conference in SPIE Optics + Photonics 2014, San Diego, California, USA, August 17, 2014.

[9] 宮内雄平, “カーボンナノチューブの光物性制御”, 応用物理学会関西支部, 平成 25 年度第 3 回講演会, 大阪大学 吹田キャンパス フォトニクスセンター, 2014 年 2 月 28 日.

[10] 宮内雄平, “点と線の光物質科学”, 戦略目標「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」3 研究領域合同公開シンポジウム, コクヨホール, 東京, 2013 年 10 月 17 日.

[11] 宮内雄平, “Exciton Photophysics of a Dot in a Line”, 第 5 回熱工学研究会, 東京大学伊藤国際学術研究センター, 2013 年 7 月 27 日.

[12] Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, K. Matsuda, “Temperature Dependent Photoluminescence Study on Oxygen-doped Carbon Nanotubes”, WONTON'13 (5th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy), Santa Fe, New Mexico, USA, June 16-20, 2013.

[13] 宮内雄平, “単層カーボンナノチューブの電子状態と光物性に関する研究”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 2 月 29 日.

[14] Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, K. Matsuda, “Photophysics of Localized Electronic States in Oxygen-doped Carbon Nanotubes”, JSAP-OSA Joint Symposia, Ehime, Japan, September 12, 2012.

[15] 宮内雄平, “カーボンナノチューブの光

学特性とその制御”, 第 2 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会, 東北大学, 2012 年 9 月 4 日.

[16] Y. Miyauchi, “Tuning the Optical Response of Carbon Nanotubes,” International Conference of Young Researchers on Advanced Materials”, Singapore, July 2, 2012.

[17] Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, K. Matsuda, “Luminescence Properties of Oxygen-Doped Carbon Nanotubes”, Thirteenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT12), Brisbane, Australia, June 25, 2012.

〔図書〕 (計 2 件)

[1] 宮内雄平, 松田一成, 単層カーボンナノチューブにおける高効率励起子発光現象, 『応用物理』, vol. 83, No. 6 (2014) pp. 473-477.

[2] 宮内雄平, 松田一成, カーボンナノチューブにおける励起子次元性の変換と発光増幅現象, 『固体物理』, vol. 49, No. 6 (2014), pp. 419-428.

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ

<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