

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22226006

研究課題名(和文)単層カーボンナノチューブの構造制御合成とエネルギーデバイス応用

研究課題名(英文)Structure-controlled synthesis of single-walled carbon nanotubes and application in energy devices

研究代表者

丸山 茂夫 (Maruyama, Shigeo)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90209700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,300,000円

研究成果の概要(和文)：ナノテクノロジーの中心的材料の1つである単層カーボンナノチューブ(single-walled carbon nanotube, SWNT)のエネルギー機器応用を目的とし、SWNTのCVD合成技術やその構造制御合成法、また物性評価手法と同時に、様々な形態の太陽電池における電極や透明膜としての応用技術の開発を行った。様々な構造を持つSWNTの作製技術を確立、SWNTの光学特性や熱物性を明らかにすると同時に、シリコンとヘテロ接合を形成することで高効率な太陽電池も実現した。

研究成果の概要(英文)：Single-walled carbon nanotube (SWNT) is one of the important materials in nano-technology. We have developed the CVD synthesis techniques, structure control techniques, evaluation methods of the physical properties, and applied technologies as electrodes or transparent films. The fabrication techniques of various structured-SWNTs were established, and the optical and thermal properties of SWNT samples were elucidated. Moreover, we succeeded in the fabrication of silicon-SWNT hetero-junction solar cells with high-efficiency.

研究分野：熱分子工学

キーワード：カーボンナノチューブ CVD合成 構造制御 光・電気特性 エネルギー応用

1. 研究開始当初の背景

単層カーボンナノチューブ (single-walled carbon nanotube, SWNT) は、炭素の共有結合のみからなる1次元の構造に由来して、バリスティックな電気伝導性、極めて高い熱・化学的安定性、強靱かつ柔軟な機械的性質を有することで、ナノテクノロジーの構成部材として注目されている。その重要性から、多岐にわたる基礎研究が展開されており、豊富な知見や技術が得られている一方、実用化への道筋が不透明であるのが大きな課題である。その最大の原因は、確固たる合成技術に立脚した学術的応用研究の不足にあり、目的に併せてオンデマンドで SWNT の構造制御が可能な合成技術と、その実用化に向けた具体的なビジョンが対になった研究が切望されている。

2. 研究の目的

ナノテクノロジーの中心的材料である単層カーボンナノチューブ (SWNT) のエネルギー機器応用を目的とする。申請者らがこれまでに世界に先駆けて開発してきた高純度 SWNT の合成法や物性評価法をさらに発展させて、応用環境に適した「構造可変」の SWNT 膜材料を実現する。これを基に、SWNT 膜の膨大な比表面積、優れた電気伝導及び熱伝導特性を活かして、色素増感太陽電池や固体高分子形燃料電池の電極に応用する。これらによって、ナノ構造の制御を基にデバイス性能を最適化する真の機械分子工学を実践するとともに、SWNT の実用化への道筋を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

申請者らが開発してきたアルコール触媒 CVD 法を改良し、直径分布や配向性をオンデマンドで制御できる合成法を確立する。さらに、合成基板の濡れ性を制御して触媒を選択的に配置することによる、ナノスケールの SWNT パターンニング技術を開発し、構造可変の単層カーボンナノチューブ・アーキテクチャを実現する。一方で、密度勾配超遠心分離法によって合成後に金属と半導体 SWNT を分離する技術の開発にも力を入れ、数値解析による分離機構の理解をもとに分離精度を大幅に改善する。以上の合成技術を基に、色素増感太陽電池や固体高分子形太陽電池の電極に応用する。SWNT 膜の膨大な比表面積と高い電気伝導率による触媒効率の増大及び、化学的安定性や強靱な機械的物性による安定性の向上を、既存の技術を比較して評価する。

4. 研究成果

SWNT の方向制御の1つとして、単結晶水晶基板 (特に r 面) 上で合成することで特定の結晶方向に高密度で水平に配向した SWNT を成長させることを実現した。これに対し、走査型のラマン散乱分光装置を用いる

こと高い空間分解能での物性の分析を行った。ラマンスペクトルを元に、その配向性や構造 (直径やカイラリティ) と成長 (成長速度など) との関係进行分析した。また、合成条件 (圧力や温度) が与える SWNT の配向性や配向時の面密度への影響についての分析を行った。成長量と配向密度にはトレードオフの関係があることが分かり、低圧で合成することにより成長量は減少するが、高密度の配向 SWNT を得ることができた。さらに、水平配向 SWNT から金属性 SWNT のみを選択的に除去することで、半導体性 SWNT のみを残す技術を開発した。この技術により SWNT をチャンネルとする高性能な電界効果型トランジスタを作製することに成功した。また、ポリマー等をコーティングした後、通電加熱することで、金属的な SWNT のみを焼失させる技術の開発にも成功した。ポリマーをコーティングしない場合は、数 100 nm 程度が燃えるだけだが、コーティングすることで数 μm もの非常に長い範囲に渡って燃えることが明らかになった。

CVD 合成時における原料ガス分子として用いているエタノールに加え、窒素原子を含むアセトニトリルに注目した。炭素・水素および酸素原子から構成されるエタノールと比較し、合成されるナノチューブの直径が著しく細くなることが分かった。これは窒素原子が SWNT 成長の核である触媒金属へ影響を与え、成長モードが変化していることが示唆される。同時に窒素分子が SWNT 内部に閉じ込められる (内包) という現象を見いだした。これは新たな SWNT の物性制御方法としても非常に重要な結果と言える。また、同位体炭素 (^{13}C) を含む単層カーボンナノチューブを合成し、そのラマン散乱分光法による振動特性解析により、単層カーボンナノチューブにおけるフォノンの散乱現象の分析を行った。

SWNT の制御すべき重要な構造の1つである直径制御を様々なアプローチで行った。予め構造を制御した多孔質のゼオライト表面に金属触媒微粒子を作製することで、そこから成長する単層カーボンナノチューブの構造制御を目指した。CVD の炭素源ガスとしてエタノールだけでなくジメチルエーテルやアセトニトリルを用いることで、CVD 合成時の炭素源ガスの熱分解過程の違いによる影響や、窒素原子の単層カーボンナノチューブ構造へのドーピング効果についての知見を得ることができた。さらに、触媒微粒子としてタングステン - コバルト合金触媒や銅 - コバルト合金触媒に着目し、さらに合成条件を慎重に吟味することで、非常に直径の細い SWNT を合成することに成功した。合成条件としては、低圧力かつ低温 (500 度程度) にすることで、触媒金属が拡散・凝集して大きくなることを防いだ。直径の細い SWNT 合成技術は、取り得る構造が限られてくることから、カイラリティ制御合成

に向けた重要な知見となる

SWNTの電子デバイス応用の1つとしてSWNT-電界効果型トランジスタを透明かつフレキシブルなポリマー基板上に作製することで、非常に柔軟かつ透明なトランジスタを得ることに成功した。

ナノスケール物質の熱輸送特性分析に向け、時間領域サーモリフレクタンス法による薄膜熱物性測定装置を構築し、熱伝導率や界面熱抵抗を計測することに成功した。SWNTと金属の界面を模擬し、高配向熱分解黒鉛(HOPG)のc面に金属薄膜を蒸着し、金属-HOPG界面における界面熱抵抗を測定した。同時に、分子動力学シミュレーションおよびフェムト秒パルスレーザーを用いた時間領域サーモリフレクタンス法を用いて、分子スケールでのナノ材料の熱散逸機構、特にその非フーリエの熱伝導に着目した検証を行った。

SWNTのエネルギーデバイス応用として色素増感太陽電池の対極への応用を行った。インピーダンス計測による分析を進め、SWNTと電解液との界面における電荷輸送に太陽電池性能の低下をもたらす要因があることが示唆された。また、半導体や金属性のみを分離・精製したSWNTを用いることで、色素増感型太陽電池の対極への応用だけでなく光電極へ応用した。また、SWNTの新たな太陽電池への応用例としてシリコン基板とSWNTを接合したヘテロ接合型太陽電池を開発した。比較的高い変換効率を示す太陽電池を得ることに成功し、シリコン-SWNT界面や、SWNT膜自身の電気抵抗(シート抵抗)を低減することで、効率を向上させた。また、様々な直径やマクロスケールでの構造を持つSWNTサンプルを用いることでの性能への影響を調べ、大気中でも安定した性能の高い太陽電池を作製することに成功した。太陽電池応用としてペロブスカイト型太陽電池へSWNT応用を行い、正孔輸送層としてSWNT膜を用いた。およそ10%の効率を示す太陽電池を得ることに成功した。このことは、カーボンナノチューブが優れた正孔輸送特性(または電子のブロッキング特性)を有することを示唆している。

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 54件)うち46件を記す

(1) K. Cui, T. Chiba, X. Chen, S. Chiashi and S. Maruyama*, Structured SWNTs and Graphene for Solar Cells, *J. Nanosci. Nanotech.*, **15**, 3107-3110 (2015). 査読有. DOI:10.1166/jnn.2015.9682

(2) P. Zhao†, S. Kim, X. Chen, E. Einarsson, M. Wang, Y. Song†, H. Wang†, S. Chiashi, R. Xiang, S. Maruyama†, Equilibrium Chemical Vapor Deposition Growth of Bernal-Stacked Bilayer Graphene, *ACS Nano*, **8**, 11631 (2014). 査読有. DOI: 10.1021/nn5049188

(3) K. Otsuka, T. Inoue, S. Chiashi†, S. Maruyama†, Full-length selective removal of metallic single-walled carbon nanotubes by organic film-assisted, electrical breakdown,

Nanoscale, **6**, 8831-8835 (2014). 査読有. DOI: 10.1039/C4NR01690D

(4) K. Cui, A. S. Anisimov, T. Chiba, S. Fujii, H. Kataura, A. Nasibulin, S. Chiashi, E. Kauppinen, S. Maruyama†, Air-Stable High-Efficiency Solar Cells with Dry-Transferred Single-Walled Carbon Nanotube Films, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 11311-11318 (2014). 査読有. DOI:10.1039/C4TA01353K

(5) J. Shiomi, Nonequilibrium molecular dynamics methods for heat conduction calculations, *Annual Review of Heat Transfer*, **17**, 177-203 (2014). 査読有. DOI: 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2014007407

(6) M. Liu, R. Xiang*, W. Cao, H. Zeng, Y. Su, X. Gui, T. Wu, S. Maruyama, Z-K. Tang, Is it possible to enhance Raman scattering of single-walled carbon nanotubes by metal particles during chemical vapor deposition? *Carbon* **80**, 311-317 (2014). 査読有. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.08.069

(7) P. Zhao, A. Kumamoto, S. Kim, X. Chen, B. Hou, S. Chiashi, E. Einarsson, Y. Ikuhara, S. Maruyama, Self-Limiting Chemical Vapor Deposition Growth of Monolayer Graphene from Ethanol, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 10755-10763 (2013). 査読有. DOI:10.1021/jp400996s

(8) T. Inoue, D. Hasegawa, S. Badar, S. Aikawa, S. Chiashi, S. Maruyama, Effect of Gas Pressure on the Density of Horizontally Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes Grown on Quartz Substrates, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 11804-11810 (2013). 査読有. DOI:10.1021/jp401681e

(9) S. Harish, K. Ishikawa, S. Chiashi, J. Shiomi, S. Maruyama, Anomalous Thermal Conduction Characteristics of Phase Change Composites with Single Walled Carbon Nanotube Inclusions, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 15409-15413 (2013). 査読有. DOI:10.1021/jp4046512

(10) K. Cui, T. Chiba, S. Omiya, T. Thurakitserree, P. Zhao, S. Fujii, H. Kataura, E. Einarsson, S. Chiashi, S. Maruyama, Self-Assembled Microhoneycomb Network of Single-Walled Carbon Nanotubes for Solar Cells, *J. Phys. Chem. Lett.*, **4**, 2571-2576 (2013). 査読有. DOI:10.1021/jz401242a

(11) S. N. Schiffres, S. Harish, S. Maruyama, J. Shiomi, J. A. Malen, Tunable Electrical and Thermal Transport in Ice-Templated Multilayer Graphene Nanocomposites, through Freezing Rate Control, *ACS Nano*, **7**, 11183-11189 (2013). 査読有. DOI:10.1021/nn404935m

(12) R. Xiang, H. Zeng, Y. Su, X. Gui, T. Wu, E. Einarsson, S. Maruyama, Z. Tang, Spray coating as a simple method to prepare catalyst for growth of diameter-tunable single-walled carbon nanotubes, *Carbon*, **64**, 537-556 (2013). 査読有. DOI:10.1016/j.carbon.2013.07.034

(13) T. Thurakitserree, C. Kramberger, A. Kumamoto, S. Chiashi, E. Einarsson, S. Maruyama, Reversible Diameter Modulation of Single-Walled Carbon Nanotubes by Acetonitrile-Containing Feedstock, *ACS Nano*, **7**, 2205-2211 (2013). 査読有. DOI:10.1021/nn3051852

(14) R. Xiang, B. Hou, E. Einarsson, P. Zhao, S. Harish, K. Morimoto, Y. Miyauchi, S. Chiashi, Z. Tang, S. Maruyama, Carbon Atoms in Ethanol Do Not Contribute Equally to Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, **7**, 3095-3103 (2013). 査読有.

- DOI:10.1021/nn305180g
- (15) C. Kramberger, T. Thurakitseree, H. Koh, Y. Izumi, T. Kinoshita, T. Muro, E. Einarsson, S. Maruyama, One-dimensional N₂ gas inside single-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 55, 196-201 (2013). 査読有 . DOI:10.1016/j.carbon.2012.12.026
- (16) C. Kramberger, T. Thurakitseree and S. Maruyama, Sub-nanometer thin single walled carbon nanotubes: Nitrogen does the trick, *phys. status sol. (b)*, 249, 2369-2372 (2012). 査読有 . DOI:10.1002/pssb.201200112
- (17) T. Thurakitseree, C. Kramberger, P. Zhao, S. Chiashi, E. Einarsson, S. Maruyama, Carbon Atoms in Ethanol Do Not Contribute Equally to Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, 7, 3095-3103 (2013). 査読有 . DOI:10.1021/nn305180g
- (18) C. Kramberger, T. Thurakitseree, H. Koh, Y. Izumi, T. Kinoshita, T. Muro, E. Einarsson, S. Maruyama, One-dimensional N₂ gas inside single-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 55, 196-201 (2013). 査読有 . DOI:10.1016/j.carbon.2012.12.026
- (19) T. Thurakitseree, C. Kramberger, P. Zhao, S. Chiashi, E. Einarsson, S. Maruyama, Reduction of single-walled carbon nanotube diameter to sub-nm via feedstock, *phys. status solidi (b)*, 249, 2404-2407 (2012). 査読有 . DOI:10.1002/pssb.201200126
- (20) R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, Y. K. Kato, Enhancement of carbon nanotube photoluminescence by photonic crystal nanocavities, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 141124-1-3 (2012). 査読有 . DOI:10.1063/1.4757876
- (21) C. Kramberger, T. Thurakitseree, S. Chiashi, E. Einarsson, S. Maruyama, On the polarization-dependent Raman spectra of aligned carbon nanotubes, *Appl. Phys. A*, 109, 509-513 (2012). 査読有 . DOI:10.1007/s00339-012-7305-8
- (22) S. Harish, K. Ishikawa, E. Einarsson, S. Aikawa, T. Inoue, P. Zhao, M. Watanabe, S. Chiashi, J. Shiomi, S. Maruyama, Temperature Dependent Thermal Conductivity Increase of Aqueous Nanofluid with Single Walled Carbon Nanotube Inclusion, *Mater. Express*, 2, 213-223 (2012). 査読有 . DOI:10.1166/mex.2012.1074
- (23) R. Xiang, E. Einarsson, Y. Murakami, J. Shiomi, S. Chiashi, Z. K. Tang, S. Maruyama, Diameter modulation of vertically aligned single-walled carbon nanotubes, *ACS Nano*, 6, 7472-7479 (2012). 査読有 . DOI:10.1021/nn302750x
- (24) J. Cannon, T. J. H. Vlugt, D. Dubbeldam, S. Maruyama and J. Shiomi, A simulation study on the adsorption properties of linear alkanes on closed nanotube bundles, *J. Phys. Chem. B*, 116, 9812-9819 (2012). 査読有 . DOI:10.1021/jp3039225
- (25) T. Shiga, S. Konabe, J. Shiomi, T. Yamamoto, S. Maruyama, S. Okada, Graphene-Diamond Hybrid Structure as Spin-Polarized Conducting Wire with Thermally-Efficient Heat Sinks, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 233101-1-4 (2012). 査読有 . DOI:10.1063/1.4725485
- (26) S. Maruyama and R. Xiang, CVD Growth, Optical and Thermal Characterization of Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, 134, 051024-1-6 (2012). 査読有 . DOI:10.1115/1.4005713
- (27) R. Xiang, E. Einarsson, J. Shiomi and S. Maruyama, Feedstock Diffusion and Decomposition in aligned carbon nanotube arrays, *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, 134, 051023-1-4 (2012). 査読有 . DOI:10.1115/1.4005703
- (28) S. Harish, K. Ishikawa, E. Einarsson, S. Aikawa, S. Chiashi, J. Shiomi, S. Maruyama, Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol with single-walled carbon nanotube inclusions, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 3885-3890 (2012). 査読有 . DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.001
- (29) S. Chiashi, H. Okabe, T. Inoue, J. Shiomi, T. Sato, S. Kono, M. Terasawa, S. Maruyama, Growth of Horizontally Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes on the Singular R-Plane (10-11) of Quartz, *J. Phys. Chem. C*, 116, 6805-6808 (2012). 査読有 . DOI:10.1021/jp210121n
- (30) F. Nishimura, T. Shiga, S. Maruyama, K. Watanabe, J. Shiomi, Thermal Conductance of Buckled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51, 0151022-1-0151022-1-5 (2012). 査読有 . DOI:10.1143/JJAP.51.015102
- (31) T. Thurakitseree, C. Kramberger, P. Zhao, S. Aikawa, S. Harish, S. Chiashi, E. Einarsson, S. Maruyama, Diameter-Controlled and Nitrogen-Doped Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes, *Carbon*, 50, 2635-2640 (2012). 査読有 . DOI:10.1016/j.carbon.2012.02.023
- (32) S. Aikawa, E. Einarsson, T. Thurakitseree, S. Chiashi, E. Nishikawa, S. Maruyama, Deformable transparent all-carbon-nanotube transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 063502-1-063502-4 (2012). 査読有 . DOI:10.1063/1.3683517
- (33) J. H. Cha, S. Chiashi, J. Shiomi, S. Maruyama, Generalized model of thermal boundary conductance between SWNT and surrounding supercritical Lennard-Jones fluid. derivation from molecular dynamics simulations, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 2008-2013 (2012). 査読有 . DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.056
- (34) P. Zhao, E. Einarsson, R. Xiang, Y. Murakami, S. Chiashi, J. Shiomi, S. Maruyama, Isotope-induced elastic scattering of optical phonons in individual suspended single-walled carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.*, 99, 093104-1-093104-3 (2011). 査読有 . DOI:10.1063/1.3632076
- (35) B. Hou, R. Xiang, T. Inoue, E. Einarsson, S. Chiashi, J. Shiomi, A. Miyoshi, S. Maruyama, Decomposition of Ethanol and Dimethyl Ether during Chemical Vapor Deposition Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 065101-1-065101-4 (2011). 査読有 . DOI:10.1143/JJAP.50.065101
- (36) P. Zhao, E. Einarsson, G. Lagoudas, J. Shiomi, S. Chiashi, S. Maruyama, Tunable separation of single-walled carbon nanotubes by dual-surfactant density gradient ultracentrifugation, *Nano Research*, 4, 623-634 (2011). 査読有 . DOI:10.1007/s12274-011-0118-9
- (37) S. Aikawa, R. Xiang, E. Einarsson, S. Chiashi, J. Shiomi, E. Nishikawa, S. Maruyama, Facile Fabrication of All-SWNT Field-Effect Transistors, *Nano Research*, 4, 580-588 (2011). 査読有 . DOI:10.1007/s12274-011-0114-0
- (38) C.-T. Lin, C.-Y. Lee, T.-S. Chin, K. Ishikawa,

R. Xiang, J. Shiomi, S. Maruyama, Anisotropic electrical conduction of vertically-aligned single-walled carbon nanotube films, *Carbon*, 49, 1446-1452 (2011). 査読有. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.12.014

(39) S. Aikawa, E. Einarsson, T. Inoue, R. Xiang, S. Chiashi, J. Shiomi, E. Nishikawa, S. Maruyama, Simple Fabrication Technique for Field-Effect Transistor Array Using As-Grown Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. App. Phys.*, 50, 04DN08-1-04DN08-4 (2011). 査読有. DOI: 10.1143/jjap.50.04dn08

(40) K. Sato, R. Saito, A.-R. T. Nugraha and S. Maruyama, Excitonic effects on radial breathing mode intensity of single wall carbon nanotubes, *Chem. Phys. Lett.*, 497, 94-98 (2010). 査読有. DOI: 10.1016/j.cplett.2010.07.099

(41) Y. Izu, J. Shiomi, Y. Takagi, S. Okada and S. Maruyama, Growth mechanism of single-walled carbon nanotube from catalytic reaction inside carbon nanotube template, *ACS Nano*, 4, 4769-4775 (2010). 査読有. DOI: 10.1021/nn100461r

(42) J. E. Bohn, P. G. Etchegoin, E. C. Le Ru, R. Xiang, S. Chiashi, S. Maruyama, Estimating the Raman cross sections of single carbon nanotubes, *ACS Nano*, 4, 3466-3470 (2010). 査読有. DOI: 10.1021/nn100425k

(43) M. A. Panzer, H. M. Duong, J. Okawa, J. Shiomi, B. L. Wardle, S. Maruyama, K. E. Goodson, Temperature-Dependent Phonon Conduction and Nanotube Engagement in Metalized Single Wall Carbon Nanotube Films, *Nano Lett.*, 10, 2395-2400 (2010). 査読有. DOI: 10.1021/nl100443x

(44) H. M. Duong, N. Yamamoto, K. Bui, D. V. Papavassiliou, S. Maruyama, B. L. Wardle, Morphology effects on non-isotropic thermal conduction of aligned single- and multi-walled carbon nanotubes in polymer nanocomposites, *J. Phys. Chem. C*, 114, 8851-8860 (2010). 査読有. DOI: 10.1021/jp102138c

(45) Z. Zhang, E. Einarsson, Y. Murakami, Y. Miyauchi and S. Maruyama, Polarization dependence of radial breathing mode peaks in resonant Raman spectra of vertically aligned single-walled carbon nanotubes, *Phys. Rev. B*, 81, 165442-1-165442-9 (2010). 査読有. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.165442

(46) R. Xiang, E. Einarsson, J. Okawa, T. Thurakitserree, Y. Murakami, J. Shiomi, Y. Ohno, S. Maruyama, Parametric study of ACCVD for controlled synthesis of vertically aligned single-walled carbon nanotubes, *J. Nanosci. Nanotech.*, 10, 3901-3906 (2010). 査読有. DOI: 10.1166/jnn.2010.2011

[学会発表] (計 24 件) 招待講演 24 件

(1) *S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, S. Chiashi, Carbon Nanotube-Si Heterojunction Solar Cells (invited), The 8th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena, 2014 年 7 月 13 日~7 月 16 日, Santa Cruz, CA, USA.

(2) *S. Maruyama, T. Thurakitserree, S. Kim, C. Kramberger, S. Chiashi, E. Einarsson, Nitrogen-Incorporated Single-Walled Carbon Nanotubes for Devices (invited), 8th International Workshop on Metrology, Standardization and Industrial Quality of Nanotubes (MSIN14), 2014 年 6 月 1 日, Los Angeles, California, USA.

(3) *S. Maruyama, T. Thurakitserree, S. Kim, C. Kramberger, S. Chiashi, E. Einarsson,

Nitrogen-Incorporated Single-Walled Carbon Nanotubes for Devices (invited), 225th ECS Meeting (Electrochemical Society), 2014 年 5 月 11 日~5 月 16 日, Orlando, Florida, USA.

(4) J. Shiomi, Effect of phonon-blocking at sintered interfaces (invited), American Physical Society, 2015 年 3 月 2 日~3 月 6 日, San Antonio, USA.

(5) J. Shiomi, Nanoscale thermal transport in thermoelectrics (invited), The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15), 2014 年 8 月 10 日~8 月 15 日, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan.

(6) J. Shiomi, Phonon transport analysis of crystals with strong anharmonicity, disorders, interfaces, and nanostructures (invited), 8th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena -Science and Engineering -2014 年 7 月 13 日~7 月 16 日, Santa Cruz, CA, USA.

(7) J. Shiomi, Anharmonic phonon dynamics in bulk crystals and their interfaces (invited), 2nd International Conference on Phononics and Thermal Energy Science, 2014 年 05 月 28 日~5 月 28 日, Shanghai, China.

(8) S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, X. Chen, R. Xiang, S. Chiashi, Single-Walled Carbon Nanotubes and Graphene as Highly Efficient Hole Extraction and Transport Layer for Solar Cells (invited), International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2015, 2015 年 3 月 7 日~3 月 14 日, Kirchberg in Tirol, Austria.

(9) T. Thurakitserree, C. Kramberger, S. Chiashi, E. Einarsson, *S. Maruyama, CVD Growth Control of Single-walled Carbon Nanotubes by Nitrogen (invited), The 4th Symposium of Emerging Electronics: Nanomaterials for Energy and Electronics, 2013 年 11 月 10 日~11 月 14 日, Jeju Island, Korea.

(10) S. Maruyama, K. Cui, E. Einarsson, S. Chiashi, Self-Assembled Micro-Honeycomb Network of Single-Walled Carbon Nanotubes for Heterojunction Solar Cells (invited), ChinaNano2013, 2013 年 9 月 5 日~9 月 7 日, Beijing, China.

(11) S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, E. Einarsson, S. Chiashi, Self-Organized Micro-Honeycomb Network Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes for Photovoltaic Devices (invited), ASME 2013 Heat Transfer Conference, 2013 年 7 月 14 日~7 月 19 日, Minneapolis, MN, USA.

(12) S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, E. Einarsson, S. Chiashi, Self-assembled micro-honeycomb network of single-walled carbon nanotubes for heterojunction solar cell (invited), 1st Carbon Nanotube Thin Film Applications Symposium, 2013 年 6 月 29 日~6 月 29 日, Tallink Conference and Spa Hotel, Tallinn, Estonia.

(13) K. Cui, T. Chiba, T. Thurakitserree, X. Chen, H. Kinoshita, P. Zhao, T. Inoue, E. Einarsson, S. Chiashi, *S. Maruyama, Structured SWNTs and Graphene for Photovoltaic devices (invited), the 5th International Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, 2013 年 6 月 16 日~6 月 20 日, Santa Fe, New Mexico, USA.

(14) S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, E. Einarsson, S. Chiashi, Self-Organized Micro-Honeycomb Network Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes for Photovoltaic Devices (Invited), ASME 2013 Summer Heat Transfer Conf., 2013 年 7 月 14 日~7 月 19 日, Minneapolis, U.S.A.

(15) K. Cui, T. Chiba, T. Thurakitserree, X. Chen,

H. Kinoshita, P. Zhao, T. Inoue, E. Einarsson, S. Chiashi, S. Maruyama, Structured SWNTs and Graphene for Photovoltaic devices (invited), 5th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, 2013年6月16日～6月20日, Santa Fe, U.S.A.

(16) S. Maruyama, CVD growth control of carbon nanotubes (invited), Frontiers of Nanochemistry - 2013, 2013年6月6日～6月7日, Beijing, China.

(17) K. Cui, T. Chiba, H. Kinoshita, P. Zhao, T. Thurakitseree, T. Inoue, E. Einarsson, S. Chiashi, S. Maruyama, Micro-Honeycomb Network Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes for Heterojunction Solar Cell (invited), 223rd ECS Meeting, 2013年5月12日～5月16日, Toronto, Canada.

(18) S. Maruyama, K. Cui, T. Chiba, E. Einarsson, S. Chiashi, CVD Growth of Self-Organized Micro-Honeycomb Network Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes for Photovoltaic Devices (invited), IWEPNM 2013, 2013年3月2日～3月9日, Kirchberg, Austria.

(19) S. Maruyama, Single-walled Carbon Nanotube/n-Si Heterojunction solar cell (invited), TeraNano2013 Wurzburg meeting, 2013年3月1日～3月3日, Wurzburg, Germany.

(20) S. Maruyama, K. Hisama, T. Noguchi, T. Kawasuzuki, Y. Takaki, J. Shiomi, S. Chiashi, A molecular dynamics simulation of SWNT growth by CVD method -- Octopus and VLS modes -- (invited), 2012 A3 Symposium of Emerging Materials: Nanomaterials for Energy and Environments, 2012年10月29日～11月1日, Sendai, 東北大学.

(21) S. Maruyama, CVD growth control of single-walled carbon nanotubes (invited), TeraNano 2012, 2012年7月4日～7月5日, Okinawa, 沖縄電磁波技術センター.

(22) E. Einarsson, T. Thurakitseree, S. Aikawa, C. Kramberger, S. Chiashi, E. Nishikawa, S. Maruyama, Tailored Synthesis of Single-walled Carbon Nanotubes for Applications (invited), ICYRAM 2012, 2012年7月1日～7月6日, Singapore, Singapore.

(23) E. Einarsson, R. Xiang, S. Aikawa, S. Chiashi, S. Maruyama, Growth mechanism and morphology control of single-walled carbon nanotubes synthesized by alcohol CVD (Invited), Pacificchem 2010, 2010年12月18日, Honolulu, Hawaii, USA.

(24) E. Einarsson, R. Xiang, S. Aikawa, P. Zhao, S. Maruyama, Preparation of single-walled carbon nanotubes for electronic and photonic applications (Invited), 19th Korean Photonics Conference, 2010年12月2日, Hoengseong, South Korea.

〔図書〕(計 3 件)

- (1) 塩見 淳一郎 他 (日本熱物性学会編) 「ナノ・マイクロスケール熱物性ハンドブック「カーボンナノチューブの熱伝導率」5.1.2, 6.1.1 節 養賢堂 (2014) 総ページ数: 459.
- (2) 丸山 茂夫「パリティ (True Nano なカーボンナノチューブ)」丸善出版株式会社 (2014) 6 ページ.
- (3) 丸山茂夫, 千足昇平 (多数共著)「カーボンナノチューブ・グラフェン ハンドブック」コロナ社 (2011) 総ページ数: 356. [産業財産権]

○取得状況 (計 3 件)

名称: 密な部分及び疎な部分を有する単層カーボンナノチューブを有する膜及びその製造方法, 並びに該膜を有する材料及びその製造方法

発明者: 丸山 茂夫, 千足 昇平, 崔 可航
権利者: 東京大学 TL0

種類: 特許

番号: 特願 2013-041181

出願年月日: 2013年3月1日

国内外の別: 国内

名称: 単層カーボンナノチューブ, 垂直配向単層カーボンナノチューブの多層膜, およびこれらの製造方法

発明者: 丸山茂夫, トウラキットセーリー
ティエラボン

権利者: 東京大学 TL0

種類: 特許

番号: 特願 2013-34493

出願年月日: 2013年2月25日

国内外の別: 国内

名称: カーボンナノチューブアレイ, 材料, 電子機器, カーボンナノチューブアレイの製造方法および電界効果トランジスタの製造方法

発明者: 丸山 茂夫, 千足 昇平, 大塚 慶吾, 井ノ上 泰輝

権利者: 東京大学 TL0

種類: 特許

番号: PCT/JP2015/055770

出願年月日: 2015年2月27日

国内外の別: 国際

〔その他〕

ホームページ等

東京大学大学院 丸山・千足研究室 HP:

<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学大学院 塩見研究室 HP

<http://www.phonon.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 茂夫 (MARUYAMA Shigeo)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 90209700

(2) 研究分担者

塩見 淳一郎 (SHIOMI Junichiro)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 40451786

千足 昇平 (CHIASHI Shohei)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号: 50434022