

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」

平成 14 年度採択研究代表者

篠原 久典

(名古屋大学大学院理学研究科 教授)

「新世代カーボンナノチューブの創製、評価と応用」

1. 研究実施の概要

本研究プロジェクトでは、新規カーボンナノチューブの創製、評価、電子物性の実験的理論的研究および電子デバイス応用に向けた、今までに例のない創製から応用まで一貫した研究を推進するため、名大、東レ(株)・(株)東レリサーチセンター、青山学院大、東北大および富士通(株)で研究チームを構成している。この結果、平成 17 年度では、(1) 金属外接型フラーレンピーポットの初めての創製とその高分解能 TEM 観察の成功、(2) 極細 2 層カーボンナノチューブの合成・精製と高純度 2 層カーボンナノチューブからの初めての蛍光測定に成功、(3) カーボンナノチューブの共鳴ラマン分光と発光分光の実験結果から、螺旋度の異なるナノチューブの存在比を理論的に求めることに成功、(4) アルミナ細孔中の多層カーボンナノチューブで $T_c=12K$ という世界最高温度で超伝導転移を発現させることに成功、および、(5) 新世代ナノチューブデバイス設計に向けて、これまでに分散法により DWNT-FET を試作に成功した。今後は、各グループと今まで以上に密に連携を取り、日本発の新世代カーボンナノチューブ物質の基礎と応用を世界に向けて、更にアピールしたい。

2. 研究実施内容

本研究プロジェクトでは、新規カーボンナノチューブの創製、評価、電子物性の実験的理論的研究および電子デバイス応用に向けた、今までに例のない創製から応用まで一貫した研究を推進するため、名大、東レ(株)・(株)東レリサーチセンター、青山学院大、東北大および富士通(株)で研究チームを構成している。以下に各研究グループの具体的な研究実施内容を箇条書きにする：

(1) 名古屋大学グループ：

新規ナノチューブ物質、特に 2 層カーボンナノチューブ (DWNT) の高純度かつ高品質の合成を、名古屋大学グループが独自に開発したゼオライト基盤を用いた化学気相蒸着 (CCVD) 法を用いて実現した。特に、直径が細く、バンドルを作る DWNT の高純度合成に成功した。また、最近、名大・東レの共同研究グループが開発した、メゾポーラスシリカをテンプレートとする CCVD 法で更に高品質の DWNT の創製を行った。さらに、各種の金

属原子を内包したフラーレン（金属内包フラーレン）を、単層カーボンナノチューブ（SWNT）あるいは多層カーボンナノチューブ（MWNTs）に内包させ、新規のナノチューブ・金属内包フラーレンのハイブリッド物質（通称、ピーポット）を創製することにも成功した。

ゼオライトおよびメソポーラスシリカ基盤を用いた触媒気相化学蒸着法（CCVD）により、高純度・高品質の DWNT の合成に成功した。特に、直径が 2 nm 前後の細い DWNT は単層カーボンナノチューブと同様に、束（バンドル）を形成する。バンドルを形成する DWNT は、従来の直径が 3 – 5 nm と太い DWNT と比較して欠陥が少ない、しなやかなチューブであることが分った。

カーボンナノチューブに各種の金属内包フラーレンを内包した、ナノ・ピーポットを合成した。特に、テルビウムやガドリニウム金属内包フラーレン・ピーポットでは、内包された金属原子のリアルタイムでのダイナミクスを高分解能 TEM で追跡することに、世界に先駆けて成功した。テルビウム金属原子がフラーレンから離れ、フラーレンとカーボンナノチューブが作る内部空間を彷徨する様子を実験的に観測することに成功した。また、セシウム原子が C_{60} に外接したピーポット、 $(CsC_{60})_n@SWNT$ 、を世界に先駆けて創製してその高分解能電子顕微鏡像を得ることに成功した（図 1）。

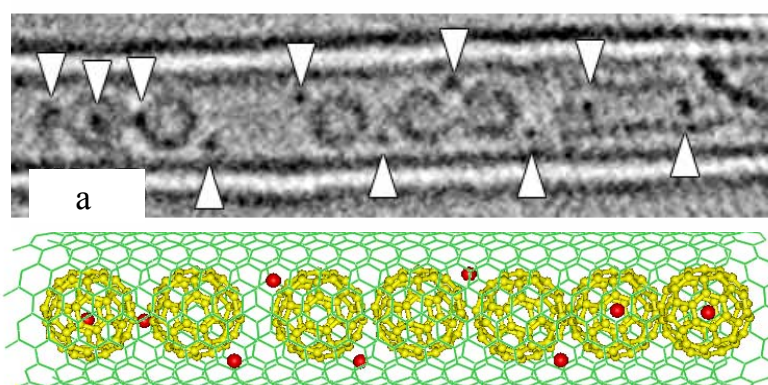


図 1. 世界初の外接金属フラーレン・ピーポット、 $(CsC_{60})_n@SWNT$ 、の高分解能 TEM 像とそれに基づく構造モデル

以上の成果概要にあるように、高純度の 2 層カーボンナノチューブや金属内包フラーレン・ピーポットなどの新規なナノチューブ物質の合成に成功し、また、これらの電子デバイスへの応用にも大きな成果が得られつつある。また、知的財産に関しても、主に 2 層 CNT 関連を中心に、現在まで 4 件の特許申請を行っている。これは本研究が基礎研究のみならず応用と実用化に密接に関連していることを意味している。

（２）東レ（株）グループ：

当社が名大グループと共同で開発してきた触媒気相化学蒸着（CCVD、Catalyst-supported CVD）法において、担体としてゼオライトまたはメソポーラス材料を用いることで、直径、結晶化度、形態等の物性が異なる 2 層 CNT の合成が可能となった。ラボ装置での検討を

もとに、触媒の前処理法や反応雰囲気（不活性ガス下、真空下）の最適化を進め、試作機の作り込み、導入を行い量産化へ向けた検討を継続している。

また実際のCNT用途展開のためには精製法が必須となるが、既存の酸、アルカリを用いた担体溶解法とは全く異なる、有機溶媒と水の分離性質を利用した新規精製法を開発した。これら種々の技術開発により、CNT量産化および用途展開を図っている。

（３）東北大学グループ

東北大グループ（齋藤、Jiang、佐藤、小山、Park、泉田）は、カーボンナノチューブの共鳴ラマン分光(RRS)と発光分光(PL)の実験結果から、螺旋度の異なるナノチューブの存在比を求めることを目的に、RRS、PLの強度を計算した。この計算を行うために、前年度からナノチューブの円筒の極率を考慮し

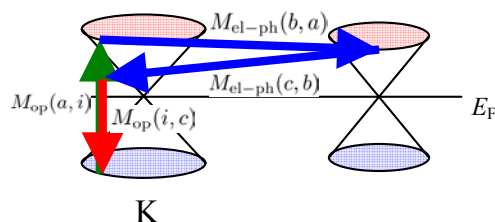


図2 2つのフォノンによるラマン散乱過程

た、電子状態計算、フォノン計算、電子格子相互作用の計算のプログラムを開発してきた。このプログラム群の完成により、共鳴ラマン分光、発光分光の光学プロセスである、（１）光誘導吸収、（２）フォノン放出による非弾性散乱、（３）光自然放出发光などの行列から、分光強度を求めることができた。これにより、図のような、２種類のフォノンからなる、二重共鳴ラマン分光のフォノンの同定が可能になった。また、どの(n, m)のナノチューブが良く光るかの情報を明らかにした。

この結果、RBM（直径が振動するモード）とGと呼ばれるフォノンモードは、強い螺旋度依存性があるが、G+フォノンモードの螺旋度依存性は、比較的小さいことを見出した。発光分光でも、緩和が非常に速く進行するナノチューブが存在することを見出した。これらは、どのナノチューブを光学材料として使ったらよいかを示唆するもので、応用上も重要な結論である。

（４）青山学院大学グループ

多層カーボンナノチューブにおける世界最高温度の超伝導発見

カーボンナノチューブ（CNTs）において過去2件しか超伝導の報告がなく、一件は単層CNTsローブにおける $T_c=0.4K$ という極低温での発見、もう一件は直径が0.4nmという単層CNTsにおけるマイスナー効果のみからの報告で電気抵抗は低温で逆に増大するものであった。これらに基づき春山チームでは多層CNTsを使って超伝導発現を探索した。そのために、多孔質アルミナ膜のナノ細孔に多層CNTsのアレイをアルコールガスで気相形成し、その先端を金電極で完全終端することを試みた。その結果、 $T_c=12K$ という世界最高温度で超伝導転移を発現させることに成功した。

またこの超伝導発現が一次元特有の物性である朝永・ラッティンジャー液体との競合に強く依存すること、この競合の度合いと T_c が多層CNTsの電氣的に活性な層数により決まる可能性を見出した。

（５）富士通（株）グループ

従来DWNTは、アーク放電等による合成後に化学処理を施し精製することにより得られて

きた。基板上に高収率かつ低温で DWNT を合成できれば、そのまま電気応用に適用することが可能となる。そこで我々は、DWNT を Si 基板上に成長することを目的に、熱フィラメント CVD (HF-CVD) による実験を行った。Fe (0.4nm) / Al (5nm) の 2 層構造を堆積した Si 基板を用い、真空槽内に導入後アセチレンとアルゴンの混合ガス (1:9) を原料として HF-CVD 法による成長を行った。成長時の基板温度は 590℃であり、成長中には混合ガスを水素により希釈した。その結果、図 1 の走査型電子顕微鏡像 (SEM) に示すように長さ約 70 μm の基板に配向したナノチューブが得られた。透過型電子顕微鏡 (TEM) による観察から (図 2)、ナノチューブは主に直径 4nm 程度の DWNT から成り、DWNT が 75% (単層ナノチューブは 15%) の高収率で成長していることがわかった。

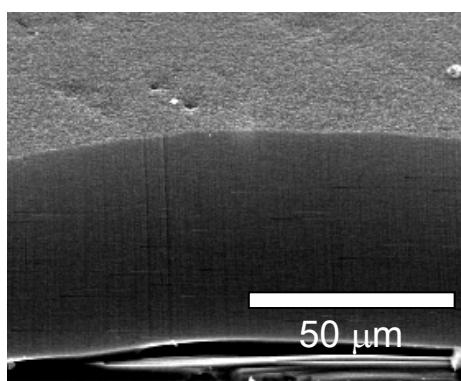


図3 基板から配向成長したナノチューブの SEM 像

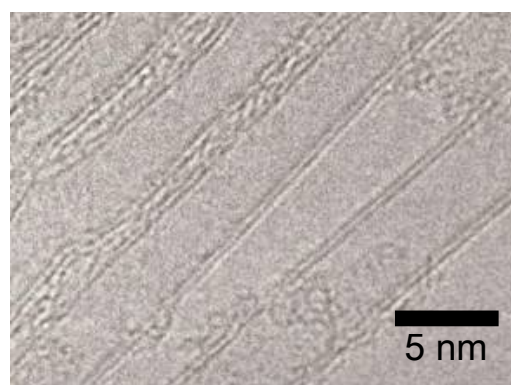


図4 DWNT の TEM 像

その他、シミュレーションでは、これまでの SWNT の形成シミュレーションを DWNT に展開するため分子動力学法に層間ポテンシャルを導入し計算を開始した。また DWNT を形成したり、加工するためのアニール炉およびエッチング装置も今年度に整備し、これらを用い、新たに提案した新構造 DWNT-FET のプロセス開発を進めていく。

(6) 東レ・リサーチグループ

新たに創製された CNT におよびそれを用いたデバイスについて、透過型電子顕微鏡 (TEM) を中心とした評価手法の確立を目指す。これまでに、TEM の評価に適したサンプル作製方法を確立し、基板上に成長させた CNT の面密度の評価、および基板との界面における触媒の分布、触媒と CNT の界面の評価を実施した。また、さらに 3 次元 TEM トモグラフィ技術を導入し、触媒/CNT 共存系における触媒の分布状況などを明らかにした。

今後は、上記の技術を発展させ、CNT/触媒界面のより詳細な評価を実施する予定である。今年度は、特に CNT/触媒共存系において、3 次元 TEM トモグラフィを適用して、触媒の分布状況を明らかにした。ここで、TEM トモグラフィとは、医療分野で用いられている CT (Computer Tomography) スキャンの技術と原理的には同等であり、様々な確度から得た透過像をフーリエ空間上で合成し、3 次元最構成像を構築し、その像から厚みゼロの断層像を取得する方法である。(画像については、非常に重たいので割愛します)。これにより、CNT と共存する触媒の存在位置、さらには触媒粒子の 3 次元的な形状分布 (粒径→体積へ) が得られるようになった。

3. 研究実施体制

「名古屋大学」グループ

- ①研究分担グループ長：篠原 久典（名古屋大学大学院理学研究科、教授）
- ②研究項目：新世代カーボンナノチューブの創製と評価、応用

「青山学院大学」グループ

- ①研究分担グループ長：春山 純志（青山学院大学理工学部、助教授）
- ②研究項目：CNT 物性の実験的解明と超伝導発現の探索

「東北大学」グループ

- ①研究分担グループ長：齋藤 理一郎（東北大学大学院理学研究科、教授）
- ②研究項目：チームの理論的サポートと実験結果の解析

「富士通デバイス基礎研究」グループ

- ①研究分担グループ長：栗野 祐二（富士通株式会社 LSI 事業本部デバイス開発統括部、統括部長付）
- ②研究項目：カーボンナノチューブおよびピーポットのデバイス応用

「東レ(株)化成品研究所」グループ

- ①研究分担グループ長：吉川 正人（東レ株式会社化成品研究所、主任研究員）
- ②研究項目：物性を制御した CNT 合成基礎検討と量産化検討

「(株)東レリサーチセンター」グループ

- ①研究分担グループ長：杉山 直之（東レリサーチセンター形態科学研究部、研究員）
- ②研究項目：TEMおよびラマン分光を用いた「ピーポット」の評価方法の確立

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- 著者氏名:M. Grobis, K. H. Khoo, R. Yamachika, Xinghua Lu, K. Nagaoka, Steven G. Louie, M. F. Crommie, H. Kato, and H. Shinohara
論文題名:Spatially Dependent Inelastic Tunneling in a Single Metallofullerene
書誌事項:Physical Review Letters, Vol.94, 136802_1~4 (2005)
発表日付:20050408
- 著者氏名:Shigeru KISHIMOTO, Yoshihiro KOJIMA, Yutaka OHNO, Toshiki SUGAI, Hisanori SHINOHARA, and Takashi MIZUTANI
論文題名:Growth of mm-Long Carbon Nanotubes by Grid-Inserted Plasma-Enhanced

Chemical Vapor Deposition

書誌事項:Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 4A, P.1554 (2005)

発表日付:20050408

- 著者氏名:Koki Urita, Kazu Suenaga, Toshiki Sugai, Hisanori Shinohara, and Sumio Iijima
論文題名:In Situ Observation of Thermal Relaxation of Interstitial-Vacancy Pair Defects
in a Graphite Gap

書誌事項:Physical Review Letters, Vol. 94, 155502-1~4 (2005)

発表日付:20050420

- 著者氏名:Atsushi TANINAKA, Haruhito KATO, Kazuhiro SHINO, Toshiki SUGAI, Seiji HEIKE, Yasuhiko TERADA, Yuji SUWA, Tomihiro HASHIZUME, and Hisanori SHINOHARA

論文題名:Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy of La₂@C₇₂ Multilayer Islands
on Si(100)-2 $\times$ 1-H Surfaces

書誌事項:Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 5A, P. 3226 (2005) (2005)

発表日付:20050510

- 著者氏名:Bao-Yun Sun, Toshiki Sugai, Eiji Nishibori, Kenichi Iwata, Makoto Sakata, Masaki Takata, and Hisanori Shinohara

論文題名:An Anomalous Endohedral Structure of Eu@C₈₂ Metallofullerenes

書誌事項:Angewandte Chemie International Edition, Vol. 44, No.29, P.4568-4571 (2005)

発表日付:20050627

- 著者氏名:A. Lassesson, K. Hansen, M. Jonsson, A. Gromov, E. E. B. Campbell, M. Boyle, D. Pop, C. P. Schulz, I. V. Hertel, A. Taninaka, and H. Shinohara

論文題名:A femtosecond laser study of the endohedral fullerenes Li@C₆₀ and La@C₈₂

書誌事項:European Physics J. D., Vol.34, P205-209 (2005)

発表日付:20050713

- 著者氏名:M. Heden, K. Hansen, F. Jonsson, E. Ronnow, A. Gromov, E. E. B. Campbell, A. Taninaka and H. Shinohara

論文題名:Thermal radiation from C+N and La@C+N

書誌事項:The Journal of Chemical Physics, Vol. 123, 044310-1~8 (2005)

発表日付:20050803

- 著者氏名:Hiroiyuki Kurachi, Sashiro Uemura, Jyunko Yotani, Takeshi Nagasako, Hiromu Yamada, Tomotaka Ezaki, Tsuyoshi Maesoba, Takehiro Nakao, Masaaki Ito, Akira Sakurai, Yahachi Saito, and Hisanori Shinohara

論文題名:Uniform carbon-nanotube emitter for field-emission displays

書誌事項:Journal of the Society for Information Display, Vol.13, No.9, P.727-733 (2005)

発表日付:20051000

- 著者氏名: Haruhito Kato, Noboru Kaneta, Susumu Nii, Kazukiyo Kobayashi, Nobuyuki Fukui, Hisanori Shinohara, and Yoshihiro Nishida
論文題名: Preparation and Supramolecular Properties of Unadulterated Glycosyl Liposomes from a Bis(α -D-mannopyranosyl)[60]Fullerene Conjugate
書誌事項: Chemistry & Biodiversity, Vol. 2, P1232-1241 (2005) (2005)
発表日付: 20051014
- 著者氏名: Yuto Kurokawa, Yutaka Ohno, Takashi Shimada, Masashi Ishida, Shigeru Kishimoto, Toshiya Okazaki, Hisanori Shinohara and Takashi Mizutani
論文題名: Fabrication and Characterization of Peapod Field-Effect Transistors Using Peapods Synthesized Directly on Si Substrate
書誌事項: Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.43, P. L 1341-1343 (2005)
発表日付: 20051014
- 著者氏名: 吾郷浩樹, 今村伸吾, 岡崎俊也, 齋藤毅, 湯村守雄, 辻正治
論文題名: CVD Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes with Narrow Diameter Distribution over Fe/MgO Catalyst and Their Fluorescence Spectroscopy
書誌事項: J. Phys. Chem. B, Vol. 109, No.20, 10035 - 10041 (2005)
発表日付: 20050504
- 著者氏名: Zheng Liu, Kazu Suenaga, Hiromichi Yoshida, Toshiki Sugai, Hisanori Shinohara and Sumio Iijima
論文題名: Determination of Optical Isomers for Left-Handed or Right-Handed Chiral Double-Wall Carbon Nanotubes
書誌事項: PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol.95, 187406-1~4 (2005) (2005)
発表日付: 20051027
- 著者氏名: 岡崎俊也, 齋藤毅, 松浦宏治, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男
論文題名: Photoluminescence Mappings of “As-Grown” Single-Walled Carbon Nanotubes: A Comparison with Micelle-Encapsulated Nanotube Solutions
書誌事項: Nano Lett., Vol. 5, No12, 2618-2623 (2005)
発表日付: 20051119
- 著者氏名: Shojun Hino, Norihiko Wanita, Kentaro Iwasaki, Daisuke Yoshimura, Takao Akachi, Takeshi Inoue, Yasuhiro Ito, Toshiki Sugai and Hisanori Shinohara
論文題名: Ultraviolet photoelectron spectra of (YC)₂@C₈₂ and Y₂@C₈₂
書誌事項: PHYSICAL REVIEW B, Vol. 72, 195424-1~5 (2005)
発表日付: 20051122
- 著者氏名: Bao-Yun Sun, Yuta Sato, Kazutomo Suenaga, Toshiya Okazaki, Naoki Kishi, Toshiki Sugai, Shunji Bandow, Sumio Iijima, and Hisanori Shinohara
論文題名: Entrapping of Exohedral Metallofullerenes in Carbon Nanotubes:

(CsC₆₀)_n@SWNT Nano-Peapods

書誌事項: J. AM. CHEM. SOC., Vol.127, 17972-17973 (2005)

発表日付: 20051206

- 著者氏名: Palanisamy Ramesh, Naoki Kishi, Toshiki Sugai, and Hisanori Shinohara
論文題名: High-Yield Synthesis of Single-Wall Carbon Nanotubes on MCM41 Using
Catalytic Chemical Vapor Deposition of Acetylene
書誌事項: J. PHYS. CHEM. B, Vol.110, 130-135 (2005)
発表日付: 20051210
- 著者氏名: P.Ramesh, T.Okazaki, T.Sugai, J.Kimura, N.Kishi, K.Sato, Y.Ozeki,
H.Shinohara
論文題名: Purification and characterization of double-wall carbon nanotubes synthesized
by catalytic chemical vapor deposition on mesoporous silica
書誌事項: CHEM. PHYS. LETT., Vol.418, 408-412 (2006)
発表日付: 20060206
- 著者氏名: Eiji Nishibori, Shintaro Narioka, Masaki Takata, Makoto Sakata, Takashi Inoue,
and Hisanori Shinohara
論文題名: A C₂ Molecule Entrapped in the Pentagonal-Dodecahedral Y₂ Cage in
Y₂C₂@C₈₂(III)
書誌事項: Chem Phys Chem, Vol. 7, 345-348 (2006)
発表日付: 20060206
- 著者氏名: J. Haruyama, I. Takesue, and N. Kobayashi
論文題名: Proximity-induced superconductivity, spin entanglement, and Luttinger liquid in
carbon nanotubes
書誌事項: Indian Journal of Chemistry, special Issue for Electrochemistry at Nano
Electrodes, Vol.44A, P.968-974 (2005)
発表日付: 20050500
- 著者氏名: R. Tamura, Y. Sawai, and J. Haruyama
論文題名: Suppression of anti-symmetry channel in the conductance of telescoped
double-wall nanotubes
書誌事項: Physical Review B, Vol. 72, Art.45413-1~10 (2005)
発表日付: 20050707
- 著者氏名: I. Takesue, J. Haruyama, N. Kobayashi, S. Chiashi, S. Maruyama, T. Sugai, and
H. Shinohara
論文題名: Superconductivity in end-bonded multiwalled carbon nanotubes
書誌事項: Physical Review letters, Vol.96, 057001 (2006)
発表日付: 20060210

- 著者氏名 :S.G. Chou, F. Plentz Filho, J. Jiang, R. Saito, D. Nezich, H.B. Ribeiro, A. Jorio, M.A. Pimenta, Ge.G. Samsonidze, A.P. Santos, M. Zheng, G.B. Onoa, E.D. Semke, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus
論文題名 :Phonon-asisted excitonic recombination channels observed in DNA-wrapped carbon nanotubes using photoluminescence spectroscopy
書誌事項 :Physical Review Letters, Vol.94, Art.127402-1~4 (2005) (2005)
発表日付 :20050401
- 著者氏名 :K. Sasaki, S. Murakami, R. Saito, and Y. Kawazoe
論文題名 :Controlling edge states of zigzag carbon nanotubes by the Aharonov-Bohm flux
書誌事項 :Physical Review B, vol.71, 195401-1~5 (2005)
発表日付 :20050503
- 著者氏名 :J. Jiang, R. Saito, A. Gruneis, S.G. Chou, G. Samsonidze, A. Jorio, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus
論文題名 :Intensity of the resonance Raman excitation spectra of single wall carbon nanotubes
書誌事項 :Physical Review B, Vol. 71, Art.205420-1~13 (2005)
発表日付 :20050527
- 025 整理番号 :160302130
著者氏名 :Stephan Roche, Jie Jiang, Francois Triozon, and R. Saito
論文題名 :Quantum Dephasing in Carbon Nanotubes due to Electron-Phonon Coupling
書誌事項 :Physical Review Letters, Vol.95, Art.076803-1~4 (2005)
発表日付 :20050808
- 著者氏名 :A. Jorio, A.P. Santos, H.B. Ribeiro, C. Fantini, M. Souza, J.P.M. Vieira, C.A. Furtado, J.Jiang, R. Saito, L.Balzano, D.E. Resasco, and M.A. Pimenta
論文題名 :Quantifying carbon-nanotube species with resonance Raman scattering
書誌事項 :Physical Review B, Vol.72, Art.075207-1~5 (2005)
発表日付 :20050816
- 著者氏名 :C.Fantini, A.Jorio, M.Souza, R. Saito, Ge.G.Samsonidze, M.S.Dresselhau, and M.A. Pimenta
論文題名 :Steplike dispersion of the intermediate-frequency Raman modes in semiconducting and metallic carbon nanotubes
書誌事項 :Physical Review B, Vol.72, Art.085446-1~5 (2005)
発表日付 :20050822
- 著者氏名 :Stephan Roche, Jie Jiang, Francois Triozon, and Riichiro Saito
論文題名 :Conductance and coherence lengths in disordered carbon nanotubes: Role of lattice defects and phonon vibrations

- 書誌事項:Physical Review B, Vol.72, 113410.1-4 (2005)
発表日付:20050919
- 著者氏名:U.J. Kim, Xiao Ming Liu, Clascidia A. Furtado, Gudan Chen, R. Saito, J. Jiang, M.S. Dresselhaus, and P.C. Eklund
論文題名:Infrared-Active Vibrational Modes of Single-Walled Carbon Nanotubes
書誌事項:Physical Review Letters, Vol.95, 157402-1~4 (2005)
発表日付:20051003
- 著者氏名:R. Saito, K. Sato, Y. Oyama, Jie Jiang, Ge.G. Samsonidze, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus
論文題名:Cutting lines near the Fermi energy of single-wall carbon nanotubes
書誌事項:Physical Review B, Vol.72, 153413_1-4 (2005)
発表日付:20051031
- 著者氏名:S.G. Chou, M.F. DeCamp, J. Jiang, Ge.G. Samsonidze, E.B. Barros, F. Plentz, A. Jorio, M. Zheng, G.B. Onoa, E.D. Semke, A. Tokmakoff, R. Saito, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus
論文題名:Phonon-assisted exciton relaxation dynamics for (6,5) enriched DNA-wrapped single walled carbon nanotube sample
書誌事項:Physical Review B, Vol.72, 195415_1-8 (2005)
発表日付:20051115
- 著者氏名:A.G. Souza Filho, N. Kobayashi, J. Jiang, A. Gruneis, R. Saito, S.B. Cronin, J. Mendes Filho, Ge.G. Samsonidze, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus
論文題名:Strain-Induced Interference Effects on the Resonant Raman Cross Section of Carbon Nanotubes
書誌事項:Physical Review Letter, Vol.95, 217403_1-4 (2005)
発表日付:20051117
- 著者氏名:Quan-Hong Yang, Peng-Xiang Hou, Masashi Unno, Seigo Yamauchi, Riichiro Saito, and Takashi Kyotani
論文題名:Dual Raman features of double coaxial carbon nanotubes with N-doped and B-doped multiwalls
書誌事項:Nano Letters, Vol.5, No.12, P.2465-2469 (2005)
発表日付:20051118
- 著者氏名:Y.Oyama, R. Saito, K.Sato, J. Jiang, A.Gruneis, Ge,G, Samsonidze, Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus
論文題名:Photoluminescence intensity of single-wall carbon nanotubes
書誌事項:Carbon, vol.44 p.873-879 (2005)
発表日付:20051128

○ 著者氏名 : A.Jorio, C.Fantini, M.A.Pimenta, D.A.Heller, M.S.Strano, M.S.Dresselhouse, Y.
Oyama, J.Jiang, and R. Saito

論文題名 : Carbon nanotube population analysis from Raman and photoluminescence
intensities

書誌事項 : Appl. Phys. Letter, vol.88, O23109-1~3 (2006)

発表日付 : 20060111

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 13 件)