

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18204033
 研究課題名（和文） カーボンナノチューブにおける高温超伝導の研究

研究課題名（英文） Study of superconductivity in carbon nanotubes

研究代表者

春山 純志 (HARUYAMA JUNJI)
 青山学院大学・理工学部・准教授
 研究者番号：70296383

研究成果の概要：

カーボンナノチューブ(CNT)における超伝導転移の再現性と転移温度(T_c)の向上を目指した研究を行った。この結果、レーザー蒸発法を使って触媒を介した単層CNTへのホウ素ドーピングに成功し、ホウ素が炭素原子を置換していることを核磁気共鳴や共鳴ラマン散乱で証明した。また、その単層ナノチューブを精製しシリコン基板上に高均一で集積し薄膜構造にした試料において $T_c=12K$ のマイスナー効果を発見することに成功し、ホウ素ドーピング量とマイスナー効果との相関を解明した。さらに、as-grownの単層CNTロープを強い超音波洗浄で完全に分散し基板上に集積・薄膜化した試料に数 10MPaの圧力を印加することで T_c を 19Kまで上昇させることに成功した。また、この T_c 上昇がCNT固有のフォノンであるRadial Breathing Modeの圧力印加による周波数上昇に起因していることを圧力依存共鳴ラマン散乱の実験から明らかにした。これらにより、今後のCNT超伝導研究の発展への大きな道筋をつけた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	23,500,000	7,050,000	30,550,000
2007年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
総計	38,100,000	11,430,000	49,530,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：カーボンナノチューブ・超伝導・ホウ素注入・ラマン測定・FET

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、炭素系新超伝導体の発見が相次ぎ注目を集めていた。2004年にはボロンを注入したダイヤモンドにおいて転移温度 $T_c=4K$ の超伝導転移が、2005年にはカルシウムを層間に挿入したグラファイト(CaC_6)において $T_c=11.5K$ の超伝導転移が、そして2006年には先端を金属電極で完全終端した多層カーボンナノチューブ(CNT：複数の異なる層が同心軸状に集合して形成されるCNT)において $T_c = 12K$ での超伝導転移が我々により発見され話題を呼んだ。

その後ダイヤモンド超伝導では $T_c \sim 10K$ までの改善や超伝導・絶縁体転移などの報告がなされ、 CaC_6 ではバルクへのCaの挿入により $T_c=15K$ までの改善が行われ、多層CNTではマイスナー効果の可能性や詳しい朝永・ラッティンジャー液体との相関などが報告されてきた。ただしどの系でも結局 T_c の上限は10K程度止まりであり、軽元素の持つ高フォノン振動数から予測される高 T_c にはまだ達していなかった。また、CNTは他の炭素元素には無い高温超伝導実現にとっての優位点をいくつか持っているが、それもまだ十分に生かせ

ていなかった。

2. 研究の目的

これらの背景を踏まえて、CNTにおいて12Kを上回る高い転移温度と高い再現性を持つ超伝導転移を実現することを目的とした。特にCNTへのキャリアドープを実現することを大きな目的とした。前述した新炭素系超伝導体の T_c の上限もキャリア注入の効率によって決まっている可能性があり、ホウ素注入濃度の最適化による高 T_c を期待した。

3. 研究の方法

試料作成にはCNT生成の触媒として炭素をペーストしたコバルト・ニッケルを用い、これらの粉末にホウ素粉末を質量制御して混ぜて固形触媒試料を形成した。これにより少なくとも触媒中のホウ素仕込み量(N_B)は制御可能になる。その後アルゴンガス雰囲気中でこの触媒にレーザー光を照射することで高温に熱し単層CNTを生成した。

まず共鳴ラマン散乱測定から、 $N_B = 4$ atomic % 以上では Radial Breathing Mode(RBM)が消滅すること、2 atomic %付近にピークの最大値が存在すること、などを発見した。これは単層CNT中に少なくとも4 atomic %のホウ素が存在すると炭素原子の六員環ネットワークを破壊してしまいCNTが消滅するというを示唆しており、キャリアドープの基礎データとして非常に大きな発見であった。ただし、触媒からCNTに実際に取り込まれるホウ素量は N_B に比べて少ないことは推察可能であるので、これらの相関を解明することがキャリアドープ実験において重要であった。

次に B^{11} を用いた核磁気共鳴(NMR)による $N_B = 1.5$ atomic %の単層CNTの元素分析で、炭素の化学結合に起因したシフトの観測に成功し、実際にホウ素原子が炭素原子を置換する形でその六員環ネットワークに取り込まれていることを証明した。

さてこのB-単層CNTは生成時に集合体として存在する。これをジクロロエタン溶媒に溶かして長時間の遠心分離、超音波洗浄を行うことで一旦集合体を解いて精製し、それらをシリコン基板上に滴下しスピンコーティングすることで純度が高く均一な薄膜構造を形成した。この薄膜形成プロセス条件の最適化は本マイスナー効果の観測において極めて重要であった。この主な目的は、マイスナー反磁性をもたらすシールド電流ループ経路を確保するためである。一本の単層CNTの直径は約1nm前後と非常に小さくしかもチューブ状であり、このCNT長手軸方向に垂直に磁場を印加した場合マイスナー電流が発生できる可能性はほとんど無い。従って薄膜状にすることで、超伝導電子状態にある複数の単層CNTをまたがる形でマイスナー電流経路が存在できると考えた。

4. 研究成果

(a) 磁化測定とマイスナー効果の同定

$N_B = 1.5$ atomic%で生成したこの高均一B-単層CNT薄膜に垂直に磁場を印加した場合の、ゼロ磁場冷却(ZFC)、磁場冷却(FC)での磁化の温度依存性を観察した。両者共に低温で反磁性を示し、ZFCではその T_c は明確に12Kであることがわかった。興味深いことにこの T_c は我々が多層CNTで電気抵抗の急激な減少の観点から報告した T_c と全く同一の値である。この磁化の磁場依存性において、磁場の増加と共に反磁性の強度は増すが、約1600 Gauss以上では逆に反磁性は弱まって消滅してゆく。各温度でのこの1600 Gauss以上での反磁性減少の線形領域を外挿してx軸を横切る点を上部臨界磁場と定義しプロットにおいて、温度の下降と共に上部臨界磁場は減少し、両者の間にはほぼ線形の相関が存在することがわかった。

この相関から見積もられる超伝導コヒーレンス長 ξ は約17nmであり、 CaC_6 のab面の $\xi_{ab} \approx 13$ nm、ボロンドープダイヤモンドの $\xi = 10$ nmに比べてもそれほど特異な値ではない。また、磁束進入長は約100nm弱と見積もれ上記 ξ よりも大きい。従って、これらの結果はこの反磁性が第二種超伝導体のマイスナー効果であることを強く裏付けるものであった。この $\xi \approx 17$ nmという値はもちろん単層CNT1本の直径約1nmより格段に大きいため、クーパー対は1本のみ単層CNTには存在し得ないことを意味し、今回薄膜状の集合体を形成したことが妥当であったことを示唆した。

このマイスナー効果の出現は大きく2つの要素に強く依存することが今回の実験から分かった。第一は、薄膜の均一性が高いほどマイスナー効果が出現し易いことである。スピンコーティングを行わない場合薄膜の均一性は極めて悪く、この場合マイスナー反磁性は確認できなかった。前述したように、これは不均一な膜ではB-単層CNT同士の結合を持った集合体が高い範囲で形成されておらず、そのため複数のCNTをまたがったマイスナー反磁性を引き起こすループ電流が存在し難いためであると解釈できた。その意味では上述した超伝導コヒーレンス長の話ともつじつまが合う。

第二は、 N_B 値が小さい試料の方が反磁性の強度が強く、明確なマイスナー効果が出現し易いことである。3種類の異なる N_B で生成した試料のZFCにおける磁化の振る舞いを観察した。その結果、 $N_B = 1.5$ atomic %で生成した試料に比べて $N_B = 2$ atomic%、3 atomic%で生成した試料では明確な反磁性は確認できず、反磁性の強度もほぼ同等で小さいことがわかった。この傾向は上部臨界磁場の値においても同様であった。一般にキャリアを高濃度でドープするほど超伝導は高温で明確に出現するのでこの結果は奇異に思えるが、これはまさに単層CNTならではの一次元性がもたらす現象として、以下のように理解できた。

(b) 一次元電子状態密度と超伝導

CNT の一次元性がもたらす電子状態として状態密度における van Hove 特異点(VHS)の存在は有名である。CNT において超伝導が確出現し難い原因は「背景」で前述した TLL の存在の他に、この VHS の存在にもある。つまり特異点以外のエネルギーでは状態密度はあつという間にゼロに落ち込んでしまうので、超伝導は出現できない。しかし逆に言えば、この VHS にうまくフェルミ準位を整合できればその超高状態密度によりかなりの高温での超伝導出現が期待できる。

さて、ホウ素ドーピングにより CNT 中のフェルミ準位はシフトしていくつかの VHS への整合が可能ではあるが、前述したように 4atomic %以上のドーピングでは CNT そのものが壊れてしまう。従って、それ以下のドーピング領域でフェルミ準位を整合できる VHS は自ずと限られる。是常、斎藤らによりカイラリティ(10,0)の半導体的単層 CNT で LDA 法により計算された電子状態密度において、この低ドーピング領域ではドーピング量を低減するに連れてある 1つの VHS に向かってフェルミ準位が整合して行く事が発見され、これが上述したマイスナー効果が明確に出現し易い理由の一つになっていることがわかった。もちろん低減しすぎると半導体のバンドギャップにフェルミ準位が入ってしまい超伝導は消滅するので、金属的伝導の CNT の使用が実験上は望ましい。また、この計算は一本の単層 CNT に対するもので、実験では異なる様々な単層 CNT が集積して薄膜を形成しているため、この VHS の効果も平均化されているはずである。しかし定性的にはこの効果が残ることは十分可能である。

(c) 電気抵抗の観察

超伝導の同定には電気抵抗のゼロオームへの減少を観察することがもちろん必須である。薄膜上に FET パターンを形成し確認したが、超伝導領域の体積率はまだ極めて小さい。従ってソース・ドレイン電極間にこの超伝導領域が運良く存在しなければ電気抵抗の落ちは観察不可能であった。実際に、ゼロ電圧付近の抵抗の低温での 1/5 程もの急激な減少を 10K 付近で確認することにいくつかの試料で成功したが、今のところ少しの電圧・磁場を印加するだけでこの特性は消えてしまい、超伝導の同定ができない状態である。

また、CNT-FET の研究では有名なように、金属電極と CNT 間の電子親和力の差が大きくショットキー接合が形成されてしまうことも CNT 中の電気抵抗の変化の精密な検出を困難にする。我々が過去指摘してきたように CNT を完全終端することが最善の解決策であるが、本薄膜構造でこれを実現するにはさらに工夫が必要である。薄膜集合体における CNT 間の接合も気になるところである。こうした観点から、電気特性の観測には注意深い実験が必須であると言える。

(d) 圧力印加実験

この B-SWNTs 薄膜を油圧セルに入れて数 GPa の圧力を印加し磁化測定を行ったが T_c にほとんど変化は見られなかった。この薄膜の構造を FESEM や AFM で詳細に観察した結果、薄膜は as-grown の直径約 10nm の CNT のロープ(集合体)からなることがわかった。そこでさらに長時間、強い超音波洗浄を行ってこれらのロープを完全に解いた後、高均一薄膜化した。この薄膜は B-SWNTs が非常に滑らかに繋がった紙状であり、バッキーペーパーと呼ばれる構造に近いことがわかった。これに圧力を印加しながら磁化測定を行ったところ、圧力ゼロで約 8 K であった T_c が僅か圧力 20MPa で 19 K まで上昇することがわかった。ただしそれ以上の印加圧力下では T_c は逆に減少することがわかった。

この原因を解明するために、上記 2 種類の試料の共鳴ラマン散乱測定を行った結果、バッキーペーパーの RBM ピークのみが圧力印加で大きく上昇することがわかった。ロープからなる薄膜とバッキーペーパーにおける、この RBM の圧力依存性の違いと電子格子相互作用の振舞いの違いを考察し、 T_c 上昇が RBM の上昇に起因していることを解明した。

(e) 結論

結局ホウ素の制御注入が CNT 超伝導の一つの鍵であると結論でき、今後 T_c の改善が必須である。その観点からは、1本の単層 CNT そのものは硬いが、(d)で述べたように集合体である薄膜への圧力印加によって CNT 間の結合が増す領域が増加しマイスナー効果の振る舞いに変化が起きる事が期待される。

さらに、(1). 触媒ホウ素濃度を 1 atomic% 以下にした B-単層 CNT における VHS へのフェルミ準位の完全整合や、(2). 直径が 0.5nm 程も細い-単層 CNT における直径対角方向炭素原子の相互作用による sp^3 混成軌道の形成とそれにより生成される $\sigma \cdot \pi$ バンド電子と RBM との強い電子格子結合、及び(3). この単層 CNT へのホウ素ドーピングによる VHS へのフェルミ準位の完全整合、によっても T_c の向上が期待できる。発見機構が特にエキジティックなものでないにせよ、何とか 30K 位までの T_c 向上が達成を今後期待したい。

もちろん、発見機構の究明、STM 観察・マイクロ波共鳴吸収などによる超伝導ギャップの同定、なども今後必須である。今後の追試結果の広がり期待が持たれる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 46 件)

1. M. Matsudaira, J. Haruyama, T. Shimizu, J. Nakamura, T. Eguchi, T. Nishio, Y. Hasegawa, H. Sano, Y. Iye, J. Reppert, A. M. Rao, "Pressure dependence of Meissner effect in boron-doped carbon nanotubes" Superlattices and Microstructures 46, 333-339 (2009) 査読有
2. M. Matsudaira, J. Nakamura, J. Haruyama, T.

- Shimizu, J. Reppert, A. M. Rao, T. Nishio, Y. Hasegawa, H. Sano, Y. Iye, "Meissner effect in boron-doped single-walled carbon nanotubes; Correlation with applied pressure and boron-doped multi-walled carbon nanotubes" 査読有
Journal of Physics 153, 012070 (2009)
3. N.Murata, J.Haruyama, M.Matsudaira, J. Reppert, A.Rao, T.Koretsune, S.Saito, Y.Yagi, "Superconductivity in thin films of boron-doped carbon nanotubes" Phys.Rev.Lett. 101, 027002 (2008) 査読有
 4. M.Matsudaira, J.Haruyama, H.Karino, N.Murata, Y.Yagi, E.Einarsson, S.Maruyama, N.Kishi, T.Sugai, H.Shinohara "Direct observation of transition from Tomonaga-Luttinger liquid states to superconductive phase in carbon nanotubes" 査読有
Physica E 40/7, 2299-2304 (2008)
 5. N.Murata, J.Haruyama, Y.Ueda, M.Matsudaira, H.Karino, Y.Yagi, E.Einarsson, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, N.Kishi, H.Shinohara, "Meissner effect in honeycomb arrays of multi-walled carbon nanotubes" Phys.Rev.B 76, 245424/1-6 (2007) 査読有
 6. I.Takesue, J.Haruyama, N.Kobayashi, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, H.Shinohara, "Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes" Physica C: Superconductivity and its applications, 460-462, pp.111-115 (2007)
 7. J.Haruyama, I.Takesue, N.Kobayashi, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, H.Shinohara, "High- T_c superconductivity in carbon nanotubes" Microelectronics Journal 39(2), 165-170 (2007) 査読有
 8. I.Takesue, J.Haruyama, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, H.Shinohara, "Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes" Phys.Rev.Lett. 96,057001/1-4(2006)査読有
 9. I.Takesue, J.Haruyama, N.Kobayashi, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, H.Shinohara, "High- T_c superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes" , Physica Status Solidi (b) 243, pp.3423-3429, (2006) 査読有
 10. J.Haruyama, K.Murakami, J.Mizubayashi, N.Kobayashi, "Possibility of quantum computation by utilizing carbon nanotubes, -Cooper pairs splitting by Tomonaga-Luttinger liquid-", in "Quantum Information Processing: From Theory to Experiment" edited by D.Angelakis, M. Christandl, A. Ekert, A.Kay, and S.Kulik, pp.312-320 Chapter 4, NATO Science Series: Computer and Systems Sciences 199 (Plenum, New York, June 2006) 査読有
 11. N.Kobayashi, J.Haruyama, I.Takesue, S.Chiashi, S.Maruyama, T.Sugai, H.Shinohara, "Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes" Journal of Solid State Phenomena Vols.121-123, pp.13-16 (2006) 査読有
 12. Y. Murakami and S. Maruyama, "Effect of dielectric environment on the ultraviolet optical absorption of single-walled carbon nanotubes", Phys. Rev.B, 79-15,155445 (2009) 査読有
 13. K. Matsuda, T. Inoue, Y. Murakami, S. Maruyama and Y. Kanemitsu, "Exciton fine structures in a single carbon nanotube revealed through spectral diffusion", Phys. Rev. B 77-19, 193405/1-4. (2008)査読有
 14. S. Chiashi, Y. Murakami, Y. Miyauchi and S. Maruyama, "Temperature Dependence of Raman Scattering from Single-walled Carbon Nanotubes -Undefined Radial Breathing Mode Peaks at High Temperatures-", Jpn. J. Appl. Phys. 47-4, 2010-2015. (2008) 査読有
 15. Y.-W. Song, S. Yamashita and S. Maruyama, "Single-walled carbon nanotubes for high-energy optical pulse formation", Appl. Phys. Lett. 92, 021115/1-3. (2008) 査読有
 16. K. Matsuda, T. Inoue, Y. Murakami, S. Maruyama and Y. Kanemitsu, "Exciton dephasing and multiexciton recombinations in a single carbon nanotube", Phys. Rev. B 77, 033406/1-4. (2008) 査読有
 17. P. T. Araujo, S. K. Doorn, S. Kilina, S. Tretiak, E. Einarsson, S. Maruyama, H. Chacham, M. A. Pimenta, A. Jorio, "The third and fourth optical transitions in semiconducting carbon nanotubes", Phys. Rev. Lett. 98, 067401/1-4. (2007) 査読有
 18. H. Hirori, K. Matsuda, Y. Miyauchi, S. Maruyama and Y. Kanemitsu, "Exciton localization of single-walled carbon nanotubes revealed by femtosecond excitation correlation spectroscopy: exciton localization", Phys. Rev. Lett. 97, 257401/1-4. (2006) 査読有
 19. Y. Miyauchi, M. Oba and S. Maruyama, "Cross-polarized optical absorption of single-walled nanotubes probed by polarized photoluminescence excitation spectroscopy", Phys. Rev. B 74-20, 205440/1-6. (2006) 査読有
 20. T. Koretsune and S. Saito, "Electronic

- structures and three-dimensional effects of boron-doped carbon nanotubes", Sci. Technol. Adv. Mater. **9**, 044203/1-4 (2008) 査読有
21. T. Koretsune and S. Saito, "Electronic structure of boron-doped carbon nanotube" Phys. Rev. B **77** 165417/1-5 (2008) 査読有
 22. P. Zhang, S. Saito, S. G. Louie, and M. L. Cohen "Theory of the electronic structure of alternating MgB₂ and graphene layered structures", Phys. Rev. B **77**, 052501/1-4 (2008) 査読有
 23. S. Saito, T. Maeda, and T. Miyake, "Energetics, Electronic Properties, and Geometries of B-Doped Diamond: A First-Principles Study" in "Diamond Electronics - Fundamentals to Applications", edited by P. Bergonzo, R. Gat, R. B. Jackman, and C. E. Nebel (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 956, Warrendale, PA, 2007), J14-03/1-6 査読有
 24. S. Saito, S. G. Louie, and M. L. Cohen, "Electronic Structure and Energetics of MgB₂ Nanotube" J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 043707 (全4ページ) (2007). 査読有

[学会発表] (計 68 件)

主な招待講演のみ記載

海外 すべて J. Haruyama,

1. "Superconductivity in boron-doped Buckypaper", International Conference on Superconductivity and Magnetism, Antalya, Turkey (April. 2010)
 2. "Superconductivity in carbon nanotubes" International Conference on Carbon Nanoscience and Nanotechnology, Belgium (August 2009)
 3. "Superconductivity in boron-doped carbon nanotubes" 9th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Beijing (July 2009)
 4. "Superconductivity in carbon nanotubes and its application", 17th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering Hawaii (July 2009)
 5. "Superconductivity in boron-doped carbon nanotubes", Joint JSPS-ESF International Conference on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, Tsukuba (March, 2009)
 6. "Superconductivity in carbon nanotubes", 1st International Conference on Nanostructured Materials and Nanocomposites, India (April, 2009)
 7. "Superconductivity in boron-doped carbon nanotubes", International Conference on Superconductivity and Magnetism Antalya, Turkey (Aug. 2008)
8. "Recent progress of study of carbon-nanotube superconductivity", 2nd International Conference on Nanostructures Self-assembly Rome, Italy (July, 2008)
 9. "Carbon nanotubes; High-T_c Superconductivity and one-dimensional electron correlation", International Symposium of Dynamical Properties on Solids 07, Porto (September 2007)
 10. "High-T_c superconductivity and its correlation with one-dimensional electron transport in carbon nanotubes", NATO Advanced Research Workshop; Electron Transport in Nanosystem, Yalta, Ukraine (September 2007)
 11. "High-T_c superconductivity in self-assembled carbon nanotubes in nano-porous alumina templates and its application", 4th annual conference, Foundation of Nano-Science 07, Self-assembled Architectures and Devices Uta, USA (April 2007)
 12. "High-T_c superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes", Trends in Nanotechnology 2006 Grenoble (September 2006)
 13. "Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes", International Workshop on Mesoscopic Superconductivity and Magnetism Chicago (August 2006)
 14. "Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes", 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-temperature Superconductors Dresden (July 2006)
 15. "High - T_c Superconductivity in entirely end-bonded multi-walled carbon nanotubes", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano (June 2006)
- 国内 すべて 春山純志
1. 「カーボンナノチューブの可能性：超伝導と一次元電子相関」早稲田大学学術講演会 物理・応用物理学科 (2009年5月、早稲田大学)
 2. 「ボロンドープカーボンナノチューブにおける超伝導」日本物理学会 2008年度秋季大会領域7・8合同シンポジウム 「炭素系、及びその周辺少数キャリア系超伝導体の新展開」 (2009年9月、熊本大学)
 3. 「カーボンナノチューブにおける超伝導：基礎と応用」 (社) 高分子学会 (2008年11月、高分子学会)
 4. 「カーボンナノチューブ超伝導の進展と

期待：ホウ素注入」 東京大学物性研究所客員所員着任講演会 (2008年5月、東京大学物性研究所)

5. 「カーボンナノチューブにおける超伝導の発見とその量子素子応用」 (財) 大阪科学技術センター・ナノカーボン材料研究会(2007年6月大阪科学技術センター)
6. 「カーボンナノチューブの電子輸送特性とそのナノ電子素子応用」、サイエンス&テクノロジー講演会 (2007年6月、大井町キュリアン)
7. 「カーボンナノチューブにおける超伝導」、(社)未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会第64回超伝導科学技術研究会ワークショップ(2006年10月化学会館)
8. 「陽極酸化の1次元チャンネルを鋳型にしたナノチューブ生成と超伝導」、日本物理学会2006年度秋季大会領域7シンポジウム「複合体化が広げるナノチューブの可能性」 (2006年9月、千葉大学)
9. 「カーボンナノチューブにおける超伝導の発見とそのスピン量子エンタングラーへの応用」 21世紀COEセミナー(2006年4月、東京工業大学)

[図書] (計16件)

1. 固体物理 トピックス「カーボンナノチューブへのキャリアドーピングと超伝導」2009年3月号 Vol.44 No.3 (2009)
2. 春山純志、「カーボンナノチューブにおける超伝導」の章、「超伝導ハンドブック」朝倉書店 秋光純、福山秀敏 編印刷中 (2009年8月出版予定)
3. 春山純志、「ナノマテリアルのための電子物性入門：量子力学とカーボンナノチューブ」 森北出版単著約250ページ(2009年度8月出版予定)
4. 春山純志、「カーボンナノチューブの超伝導とそのデバイス応用」の章、pp.168-173「ナノカーボンハンドブック」(株)エヌ・ティー・エス飯島澄男、遠藤守信 編共著 (2007年)
8. 日本物理学会誌 最近の研究から 「カーボンナノチューブにおける超伝導」 Vol.61-11, pp.826-830 (2006)
9. 春山純志、「ナノ構造制御材料：単電子効果とその素子応用」の章、pp.362-364「エコマテリアルハンドブック」丸善 共著 (2006年)
10. S. Saito and A. Zettl, "Carbon Nanotubes: Quantum Cylinders of Graphene"(Elsevier, Amsterdam, 2008) (全215ページ)

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

- 1.発明の名称：超伝導素子及びその作製方法
発明者： 春山 純志
権利者： 独立行政法人科学技術振興機構
種類： 特許
番号： 特願2008-149835
出願日： 2008年6月6日
国内外の別：国内
- 2.発明の名称：超伝導薄膜構造及びその作製方法
発明者： 春山 純志
権利者： 独立行政法人科学技術振興機構
種類： 特許
番号： 特願2008-134155
出願日： 2008年5月22日
国内外の別：国内
- 3.発明の名称： メモリ素子
発明者： 春山 純志
権利者： 独立行政法人科学技術振興機構
種類： 特許
番号： 特願2007-302201
出願日： 2007年11月21日
国内外の別：国内

[その他]

1. 日経産業新聞 第一面トップ 2009年5月15日付
 2. ナノテクジャパンニュース 2009年5月
 3. 日経産業新聞 科学面第一面 2008年7月17日付
 4. 読売新聞朝刊科学面 2008年8月10日付
 5. 日本経済新聞科学面 2008年2月11日付
 6. 日経産業新聞 2007年7月20日付
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
春山 純志 (HARUYAMA JUNJI)
青山学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：70296383
 - (2) 研究分担者
齋藤 晋 (SAITOU SUSUMU)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号：00262254
丸山茂夫 (MARUYAMA SHIGEO)
東京大学・工学系研究科・教授
研究者番号：90209700
 - (3) 連携研究者
篠原久典 (SHINOHARA HISANORI)
名古屋大学・理学研究科・教授
研究者番号：50132725