

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19054016

研究課題名（和文）機能性カーボンナノチューブを用いた量子ナノデバイスの開発

研究課題名（英文）Quantum nanodevices with functional carbon nanotubes

研究代表者

石橋 幸治 (Ishibashi Koji)

独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・主任研究員

研究者番号：30211048

研究分野： ナノ情報デバイス

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード： 量子ドット、量子閉じこめ、カーボンナノチューブ、単電子トランジスタ、単電子デバイス

1. 研究計画の概要

本研究では、カーボンナノチューブの超微細性に着目し、量子効果を利用した新しいデバイスの基礎を築くことにある。量子効果は微小なデバイスほど顕著に出ることから、カーボンナノチューブは理想的な材料である。本研究で目標とするデバイスは、単電子デバイス、単スピン生成デバイス（スピン型量子ビット）、およびアンドレーエフ型量子ビット（磁束型量子ビットの一種）である。さらに、単電子デバイスに関しては、すでに個別デバイスが作製されていることから、その集積化の可能性を探索する。また、カーボンナノチューブにおいては、デバイスプロセスが全く確立していないことから、これらのデバイスを実現するためのデバイスプロセスや、カーボンナノチューブの大きな特徴である表面の化学修飾可能性を利用して、カーボンナノチューブと分子を化学結合（CNT/分子ヘテロ接合）かあらゆる分子素ケルナノ構造の作製を目的とする。

2. 研究の進捗状況

(1) 単電子デバイスとその集積化技術の開発
単電子デバイスを集積化するには、並べてカーボンナノチューブを基板上に配置する必要がある。そこで、本間グループと共同で、水晶基板上のカーボンナノチューブ配向成長技術の開発を始めた。現在のところ、水晶基板上の配向成長に成功し、さらにそれを、デバイス作製に適した別基板に貼り付ける技術の開発まで行っている。貼り付け技術は、もともと米国のグループにより考案されたが、我々はさらに簡便な方法を考案した。貼り付けたカーボンナノチューブで単電子ト

ランジスタを作製することにも成功しており、さらに、それが人工原子構造を示すことも確認できた。このことは、本プロセスを集積型量子ナノデバイスへ応用する上で、深刻なダメージを与えないことを示している。

(2) スピン型およびアンドレーエフ型量子ビット

スピン量子ビットは実現できたものの、現時点では、操作するまでには至っていない。

アンドレーエフ量子ビットは、超伝導ループに、カーボンナノチューブをはさんだ構造である。しかし、カーボンナノチューブに超伝導電極をつけた構造自身の電気伝導特性はそれほど調べられてはおらず、本研究で、電極とカーボンナノチューブの結合状況に応じて、超伝導電流、近藤効果、多重アンドレーエフ反射など多彩な物理効果が現れることがわかった。

(3) 分子スケールナノ構造の作製

分子スケールナノ構造の例として、単層カーボンナノチューブの両端にカルボキシル基を付け、それをを用いてナノチューブ両端をエステル結合でむつび着けたリング構造を作製することに成功した。そのリング構造の電子状態を評価するために、走査トンネル顕微鏡と分光測定を同時に行える装置を用いて、トンネル分光と光吸収測定を行い、その結果から金属チューブがリング構造となることにより、半導体的になることを示した。

3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進展している。

量子ナノデバイスの種類により、最終目標までの達成度は異なる。集積化単電子デバイスに関しては、順調に研究が進んでいると言え

る。しかし、量子ビットに関しては、信頼性・安定性のある人口原子量子ドットを再現性よく作製する必要があるため、まだ、目標達成にはまだ時間がかかる。分子スケールナノ構造は予想外の研究成果であり、カーボンナノチューブが真のナノデバイス Building Block となりうることを示した点で、予想外の大きな成果であると考えている。

4. 今後の研究の推進方策

(1) 集積化単電子デバイスに関しては、単電子デバイスが有利であるメモリ構造に焦点を当て、2つのドットが容量的に結合した単電子メモリを作製する。そのための、基本的なデバイスプロセスの開発は終わっている。

(2) 量子ビットに関しては、最終的なデバイス工の動作までは行かないかもしれないが、人口減思量しドットを再現性よく作成する技術の開発と、超伝導電極を持つカーボンナノチューブの電気特性を詳細に調べ、アンドレーエフ量子ビットの最適材料であるとしての証拠を固める。

(3) 分子スケールナノ構造は、分子とナノチューブのヘテロ接合からなる構造を実際に電気測定することをめざし、カーボンナノチューブが真の分子スケールナノデバイスとして有用な材料であることを示す。

5. 代表的な研究成果

(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9件)

1. Y. Togashi, T. Hatori, Y. Nakamura, N. Aoki, J. P. Bird, M. Terrones, K. Kanako, and Y. Ochiai (査読あり): Magnetoresistance and Phase Breaking Behavior of a Nitrogen Doped Multi-Walled Carbon Nanotube, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, p. 02BD01-1-3 (2010)
2. H. Tabata, M. Shimizu, and K. Ishibashi, (査読あり) "Fabrication of single electron transistors using transfer-printed aligned single walled carbon nanotubes arrays", *Appl. Phys. Lett.* **95**, 113107, (2009)
3. T. Mori, S. Sato, K. Omura, S. Yajima, Y. Tsuruoka, Y. Achiba, and K. Ishibashi, (査読あり) "Formation of single electron transistors in single-walled carbon nanotubes with low energy Ar ion irradiation technique", *J. Vac. Sci. Technol.*, **B27**, 795-798 (2009)
4. T. Mori, K. Omura, S. Sato, M. Suzuki, K. Uchida, H. Yajima, and K. Ishibashi, (査読あり) "Improved temperature characteristics of single-wall carbon nanotube single electron transistors using CMC dispersant", *Appl. Phys. Lett.* **91**, 263511 (2007)

[学会発表] (計58件)

1. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata (invited), "Quantum dots in carbon nanotube and their molecular scale nanostructures", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP2010), Tokyo, Japan, March 9-11, 2010
2. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata, Y. Kawano and T. Yamaguchi (invited), "Carbon nanotubes for building blocks of nanoelectronic devices", International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009 (ISPD2009), Beijing, China, 17-19, June, 2009
3. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata, Y. Kawano and T. Yamaguchi (invited), "Carbon nanotube quantum dots and nanostructures", Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST2009), Harvard University, Boston, USA, May 29-31, 2009
4. K. Ishibashi, S. Y. Huang, A. Hida, H. Tabata Y. Kawano, and T. Yamaguchi (invited), "Quantum dots in carbon nanotubes and Si nanowires", International School and Workshop on Nanoscience and Nanotechnology (n&n2008), Frascati, Italy, 22-23, October, 2008
5. K. Ishibashi, T. Fuse, Y. Kawano, S. Toyokawa, and T. Yamaguchi (invited): "THz photon assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots", 2008 RCIQE International Seminar on Advanced Semiconductor Materials and Devices, Hokkaido University, 3-4th, March, 2008

[図書] (計1件)

石橋幸治:「ナノカーボンハンドブック」(遠藤守信/飯島澄男監修、エヌティーエス2007年7月)分担執筆(3章3節2項3. CNTによるナノデバイス 327-334)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]