

「ナノ界面技術の基盤構築」
平成 20 年度採択研究代表者

松本 和彦

大阪大学 産業科学研究所・教授

量子界面制御による量子ナノデバイスの実現

1. 研究実施の概要

本研究において、カーボンナノチューブを用いた1)粒子性・波動性制御デバイス、2)量子細線ナノメモリ、3)レーザー共鳴カイラリティ制御成長の3つのテーマを推進する。

1)のテーマにおいては、ゲートバイアスの値によって、粒子性を示すクーロンダイヤモンド、波動性を示すコヒーレントダイヤモンド特性が得られ、ほぼ初期の目的を達成できつつある。今後さらに発展したデバイスに進展させる予定である。

2)のテーマにおいては、基本構造の作成を実施し、メモリ効果の測定に成功しつつある。今後詳細に特性の解明、および2層絶縁膜の最適化などを実施していく予定である。

3)のテーマにおいては、レーザー照射と熱の関係を熟考し、レーザーの照射時間や最適触媒の検討を行いつつある。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

【粒子性・波動性制御量子ナノデバイス】

粒子性・波動性制御量子ナノデバイス²⁾⁴⁾は、図1に示すように、酸化シリコン基板上の単層カーボンナノチューブに 73nm の間隔でソース・ドレイン電極を形成したものである。シリコン基板の裏側にはバックゲートを設けている。カーボンナノチューブとソース・ドレイン電極との間には仕事関数差によるショットキーバリアが形成され、これによる空乏層がナノチューブ中に形成される。これがバイアスで膜厚可変のトンネルバリアとして働く。図2は、本素子のドレイン電流のゲート電圧依存性を8K で測定したものである。ドレイン電流がゲート電圧の変化に対して振動している様子が観察できる。ゲート電圧が -16V 以上の振動は、図に示すように近似的にガウス分布でフィッティングできるために、クーロン振動であることがわかる。さらにこの領域ではクーロンダイヤモンド特性も観察できた。したがってこの領域は粒子性の領域である。 -16V 以下の領域では、クーロン振動領域の周期と大きく異なる振動が生じる。この振動は図に示すようにローレンツ分布でフィッティングでき、共鳴トンネル振動であることがわかる。すなわち、カーボンナノチューブ内部に形成された定在波による量子準位を介した正孔のトンネリングであり、正孔の波動性を示すものである。

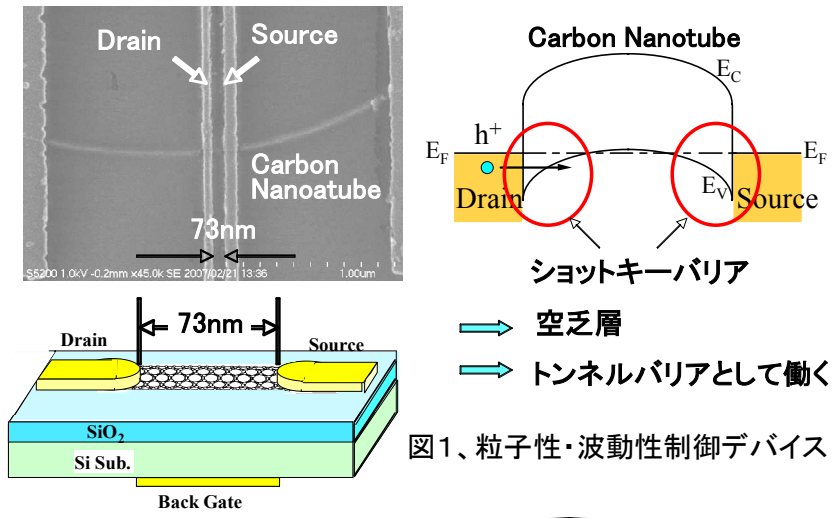


図1、粒子性・波動性制御デバイス

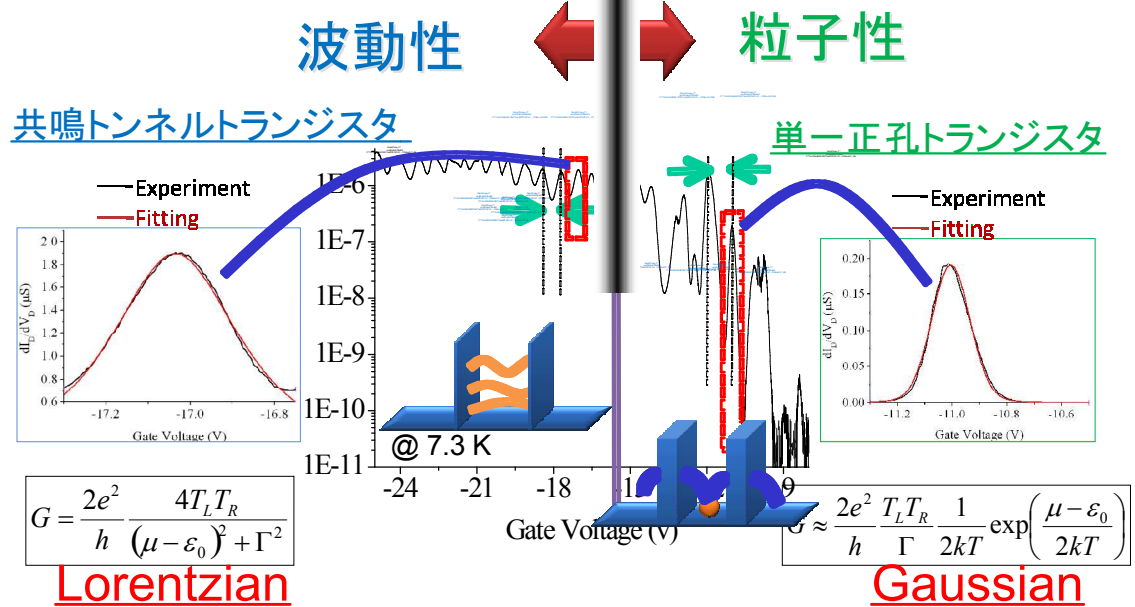


図2、粒子性と波動性のゲートバイアス依存性とピーク形状のフィッティング特性

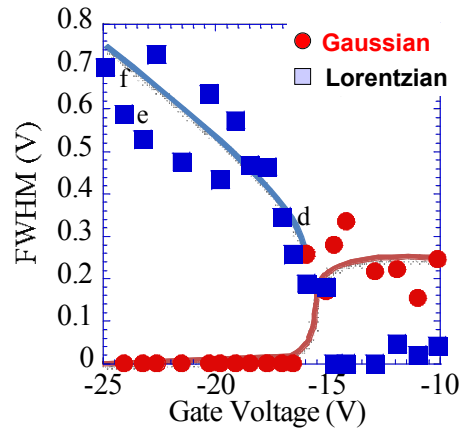


図3、Voigt Functionによる共振ピークのフィッティング

さらにガウス分布とローレンツ分布のコンボリューション関数である Voigt 関数を用いて全ゲート電圧領域に渡って振動をフィッティングさせたものが図3である。この図より、ゲート電圧が -16V 以上では振動は、ガウス分布で完全にフィッティングされ、ローレンツ分布の寄与はまったくない。ところが -16V 以下ではこの状況が完全に逆転する。この結果は、図2の結果と同様に、 -16V 以上では正孔の粒子性を示すクーロン振動であり、 -16V 以下では正孔の波動性を示すコヒーレント振動であることを示すものである。以上により、ゲート電圧により、ショットキーバリアの空乏層厚さを制御し、トンネル確率の大小関係関係により、正孔の粒子性と波動性を制御できることを示した²⁾⁴⁾。これらの成果は以下のようにまとめられる。

- 1) カーボンナノチューブ素子において、ゲート電圧でトンネル確率を変調可能であることを実証した。
- 2) 同一素子において、粒子性と波動性の特性を、ゲート電圧で制御できることを初めて示した。この研究は他に類例がなく、独創的成果であると言える。

【カーボンナノチューブの方向制御】 予想外の成果

カーボンナノチューブの方向制御は従来から重要な課題であった。アルミナや結晶石英基板上では、ある一定の方向にカーボンナノチューブが成長することが実証されている。しかしながら応用上最も重要な酸化シリコン基板上では方向制御は実現されていなかった。

本研究において、酸化シリコン基板上に、平行パターンのリッジを形成すると、カーボンナノチューブがリッジの端に沿って成長することをはじめて実証した。酸化基板を、電子ビームリソグラフィとプラズマエッチング法を用いて図4に示すようにリッジを形成する。リッジの幅は 65nm 、間隔は 100nm 、深さは 40nm である。この基板の端に触媒を形成しカーボンナノチューブを成長すると、図に示すようにリッジに沿ってカーボンナノチューブが一直線に成長する¹⁾。走査型電子顕微鏡で詳細に観察すると、カーボンナノチューブはリッジの底ではなく、リッジの上端のエッジに沿って成長することが分かった。この理由を明確にするために、リッジに沿った分子間力を計算したところ、図5に示すように分子間力の吸引力に相当するカシミール力の分布が、リッジの端において大きく集中することが判明した。カーボンナノチューブはこのカシミール力に吸引されてリッジの端に沿って成長することが明らかになった。この手法は、カーボンナノチューブをデバイス応用する上で極めて重要な基礎技術になると考えられる。

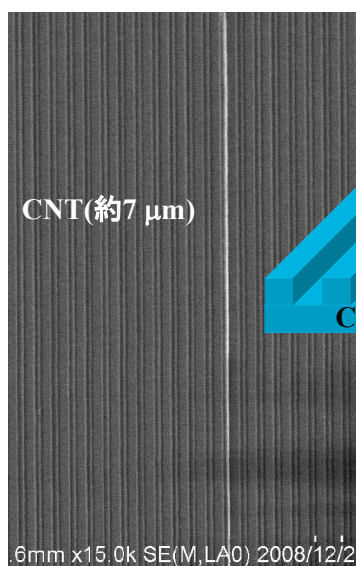


図4、カーボンナノチューブ成長方向制御

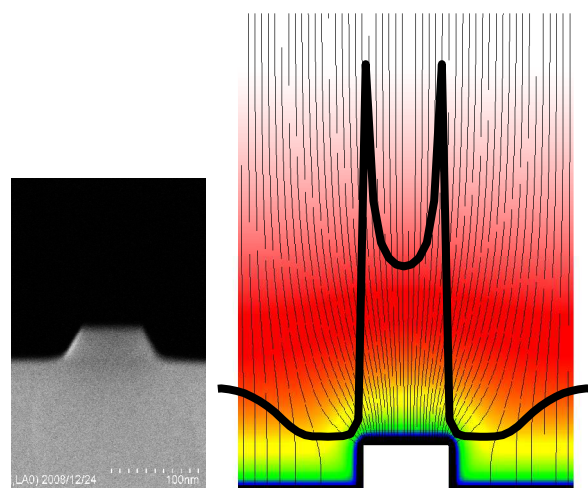


図5、カシミール力によるナノチューブの方向制御

3. 研究実施体制

(1)「松本」グループ

①研究分担グループ長:松本 和彦(大阪大学、教授)

②研究項目

カーボンナノチューブ系量子ナノデバイスの研究

(2)「永宗」グループ

①研究分担グループ長:永宗 靖((独)産業技術総合研究所、主任研究員)

②研究項目

シリコン系量子ナノデバイスの研究開発

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. Takafumi Kamimura and Kazuhiko Matsumoto “Controlling Direction of Growth of Carbon Nanotubes on Patterned SiO₂ Substrate” Appl. Phys. Express 2 (2009) pp.015005-015005-3.
2. Takafumi Kamimura, Yasuhide Ohno, and Kazuhiko Matsumoto “Transition between Particle Nature and Wave Nature in Single-Walled Carbon Nanotube Device” Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) pp. 015005-015005-3.
3. Yasuhide Ohno, Yoshihiro Asai, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto "Room-temperature-operating carbon nanotube single-hole transistors with significantly small gate and tunnel capacitances" Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 053112.
4. Takafumi Kamimura, Yasuhide Ohno, and Kazuhiko Matsumoto “Carbon Nanotube Fabry-Perot Device for Detection of Multiple Single Charge Transitions” Jpn. J. Appl. Phys. (in press)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)