

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

微少チャネルカーボンナノチューブ FET において粒子性と波動性の性質の間に近藤共鳴特性を観察し、その近藤温度がゲート電圧により制御できる事を初めて示した。また、2層絶縁膜界面に電荷を保持するナノメモリにおいて、界面に金微粒子を担持する事により電荷のトラップサイトを大きくし、ヒステリシス窓を2～3倍大きく改善する事に成功した。グラフェンデバイスの基礎プロセスと応用について検討を開始した。

§2. 研究実施体制

(1)「松本」グループ(大阪大学)

- ① 研究分担グループ長: 松本 和彦 (大阪大学産業科学研究所、教授)
- ② 研究項目(量子界面制御量子ナノデバイスの開発)
 - ・金属微粒子による量子ナノメモリの特性改善と一電荷計測の解析

(2)「永宗」グループ(産総研)

- ① 研究分担グループ長: 永宗 靖 (産業技術総合研究所、主任研究官)
- ② 研究項目(シリコン系ナノメモリの開発)
 - ・ 近藤温度のバイアス制御特性の評価
 - ・ 量子ナノメモリの予備的開発

§3. 研究実施内容

(文中の右肩の番号は(4-1)に対応する)

本研究報告では、本年特に進展した量子ナノメモリと、粒子性／波動性制御に於ける近藤温度の制御について述べる。

1) 量子界面制御量子ナノメモリ

前年度、カーボンナノチューブに、1nm の窒化シリコン／10nm の酸化シリコン2層絶縁膜を形成し、その上にトップゲートを形成したナノメモリを作成した。この素子は、トップゲート印加によりカーボンナノチューブから2層絶縁膜界面に電子あるいは正孔が注入されメモリとして動作することを示した。その際、従来 20V 以上必要であった書き込み電圧が、わずか 2V の印加電圧でもヒステリシスが生じ、メモリ動作することを証明した。しかしながら、2V 印加の場合のメモリウインドウは非常に小さく、実用化には不十分な値であった。

本年度はこれを解決するために、図1に示す様に窒化シリコン／酸化シリコン2層絶縁膜界面に金ナノ微粒子を形成しメモリウインドウの大幅な改善を行った。さらに詳細な測定により、2層絶縁膜界面より正孔が一個一個離散的に放電していく様子が観測され、単一正孔メモリの予備的な開発に成功した⁴⁾。

窒化シリコン／酸化シリコン2層絶縁膜界面に電子顕微鏡写真で示すように $1.1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ の密度で金微粒子が形成されている。一つの金微粒子のサイズは AFM 測定により直径 $\sim 2.5 \text{ nm}$ である。トップゲートはゲート長 1nm (カーボンナノチューブの直径とする)、ゲート幅 100nm および

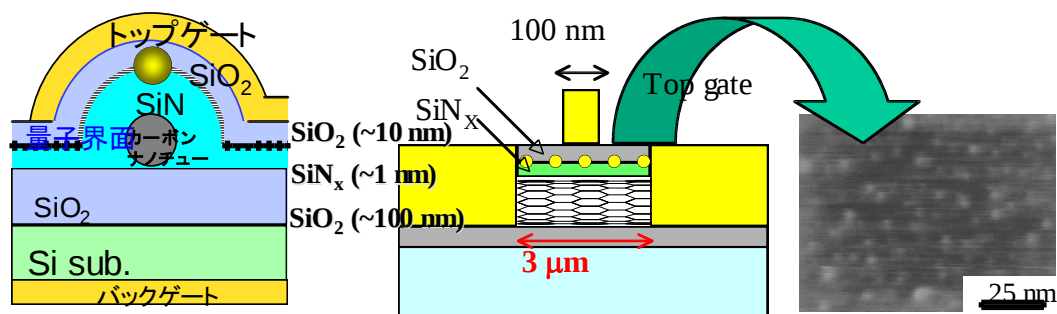


図1 金微粒子を界面に有する量子ナノメモリ

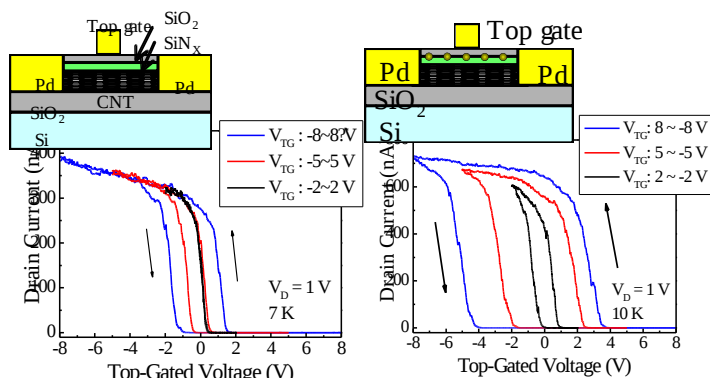


図2、ヒステリシス特性 (a) 金微粒子なし (b) 金微粒子あり

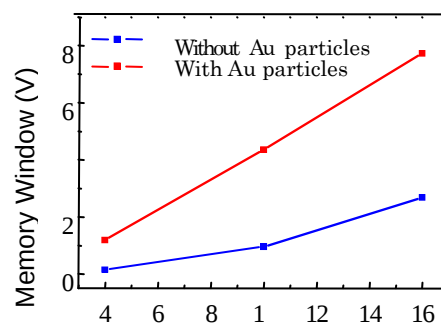


図3 金微粒子の有無によるヒステリシスの比較

500nm であるから、一つのゲートチャンネルには、金微粒子の数は1~5 である。図2に、ヒステリシ

ス特性を示す。図2(a) は前年度開発した、窒化シリコン／酸化シリコン2層絶縁膜界面で形成され、界面に金微粒子のない場合の特性である。トップゲート電圧を5V 印加した場合は明瞭なヒステリシスが生じるが、2V の場合はほとんどウインドウが開いていないことがわかる。ところが窒化シリコン／酸化シリコン2層絶縁膜界面に金微粒子を形成した場合は、図2(b)に示すように印加電圧が2V でも十分なメモリウインドウが開くことが分かった。界面に金微粒のある、なしによるメモリウインドウの印加電圧による変化を図3に示す。金微粒子がある場合、トップゲート印加電圧にもよるがほぼ3～4倍の改善が得られることが分かった。このメモリウインドウの拡大の理由は現在明確でないが、従来の界面準位よりも金微粒子の方が保持できる電荷量が多くなるためではないかと考えられる。

次に、ゲート幅を 100nm のサイズにした量子ナノメモリの特性について述べる。図4はそれぞれの電圧で書き込んだメモリの、閾値電圧の変化を示したものである。ゲート印加電圧を、4.7～4.9V、5.0～5.2V、5.3～5.5V と連続的に変化させているにもかかわらず、閾値電圧の変化は、ゲート印加電圧を3V 以上印加しないと変化が生じず、またその値は 0.26V と離散的な値になることが分かった。これは閾値の変化が一電荷によるものと結論付けることができる。さらに詳細に閾値電圧近傍を観測すると、図5に示すように、電流の不連続の跳びが各ドレイン電流で観測された。これは印加電圧の減少とともに、金微粒子に蓄積された電荷が一個一個放電して閾値が変化していく様子を示している。すなわち一電荷の放電現象を測定していることに対応する。我々はカーボンナノチューブ量子ナノメモリにおいて、一電荷の制御が可能であることを示すことができた。

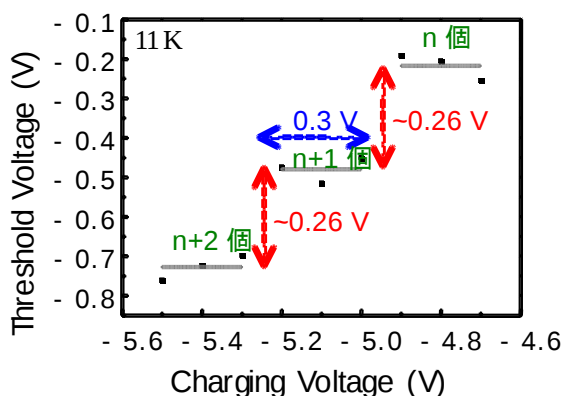


図4 書き込み電圧の離散化

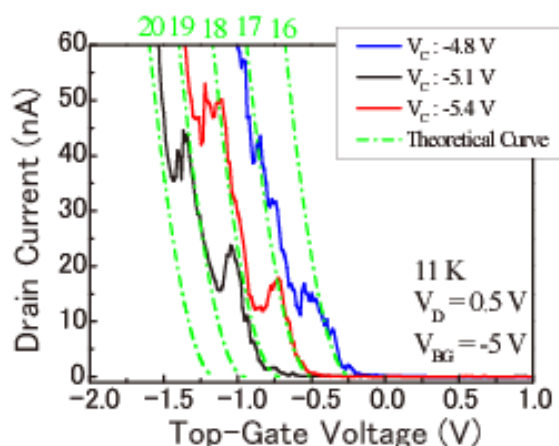


図5 単一電荷の放電特性

2) 粒子性／波動性 制御素子の開発

我々は、前年度、カーボンナノチューブにソース／ドレイン電極を形成し、バックゲート電圧を変化させる事により、ソース／ドレイン電極近傍の空乏層幅を制御し、トンネル確率を変調する事により、粒子性を示すクーロンブロック特性と、波動性を示す Fabry-Perot 共鳴伝導特性が得られる事を初めて示す事に成功した。今年度、この粒子性を示す領域と、波動性を示す領域の中間領域で、近藤共鳴が生じ、さらにその近藤温度がゲート電圧で制御できる事を示した。

図6は、カーボンナノチューブトランジスタのドレイン電流のドレイン電圧／ゲート電圧依存性を示したものである。ゲート電圧が低い領域では明瞭なクーロンダイヤモンド特性が示され、粒子性

が強調されている。またゲート電圧が 30V 以上では、クーロンダイヤモンドが消失し、Fabry-Perot 共鳴のパターンが示され、波動性が強調されている。この中間領域で網目状でマークした領域で近藤共鳴が生じている。

図7は、ゲート電圧が 25V 近傍でのクーロンダイヤモンドを示したものである。図の C-C' の領域で見た場合、通常コンダクタンスが最低になるべきクーロンダイヤモンドの中心で、コンダクタンスの増加が見られ、近藤共鳴が生じている事が分かる。図8は、一つのクーロンダイヤモンドの中で、近藤共鳴の半値幅を見たものである。近藤共鳴の半値幅は、近藤温度に比例する為、左軸に半値幅、右軸に近藤温度を示す。図8の場合、ゲート電圧を印加することにより、フェルミレベルが変化し、フェルミレベルが量子準位近傍に位置した際に最も大きな co-tunneling 電流が流れる為に、大きなコンダクタンスになり、近藤温度が高くなる。従って、クーロンブロッケードが解ける近傍領域で近藤温度が大きくなり、フェルミレベルが量子準位から最も離れた位置で、近藤温度が最低になる。

これに対して、ゲート電圧をより大きな範囲で掃引した場合の近藤温度の変化が図9である。図8に示す個々のクーロンダイヤモンドに相当する近藤温度の振動が見られる。それぞれの振動の極小点は、フェルミレベルが量子準位から最も離れた位置での近藤温度に対応する。ところがこの近藤温度の極小点が、ゲート電圧が大きくなるに従って、右上がりになっている事が分かる。これは、ゲート電圧による、空乏層の減少、すなわちトンネルバリアの減少による近藤温度の上昇である。これは従来観測されていないものであり、我々は近藤温度がトンネルバリアの変調により、制御できる事を初めて示した。

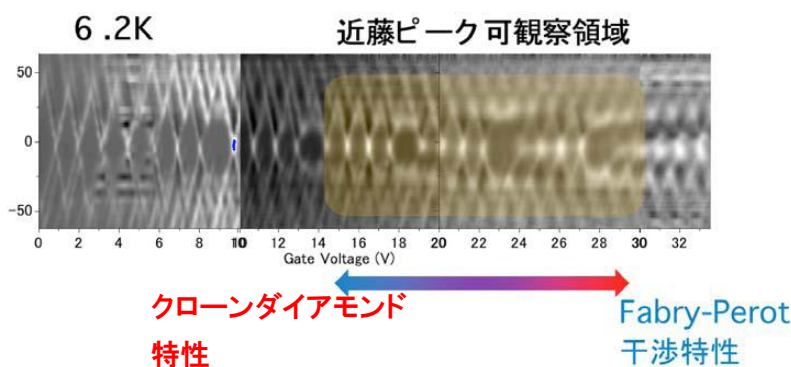


図6、クーロンブロッケード領域と、Fabry-Perot 共鳴領域の中間に生じる近藤共鳴領域

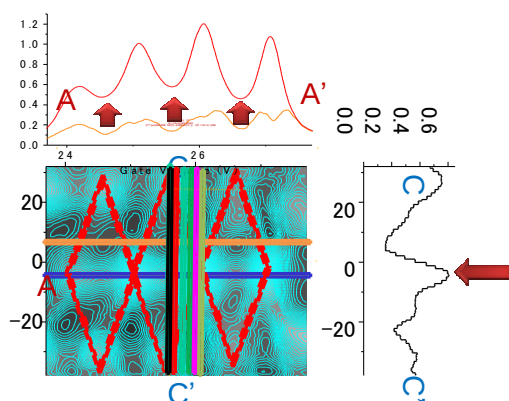


図7、近藤共鳴のバイアス

依存性

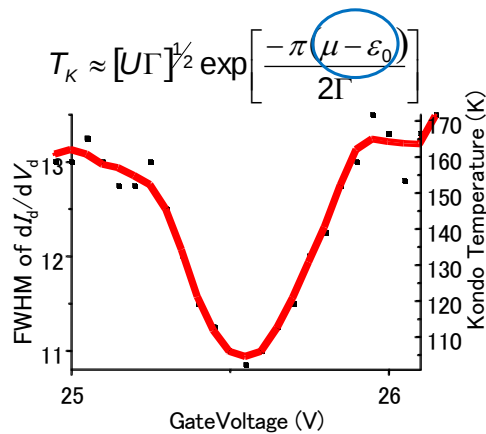
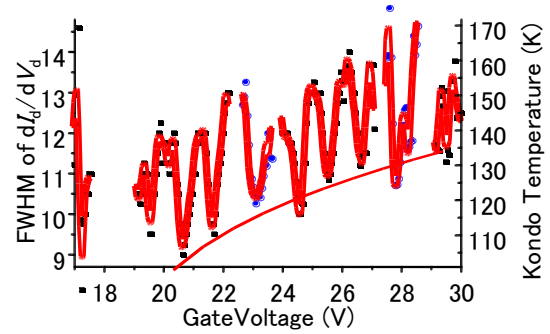


図8、フェルミ位置の変調による近藤温度のゲート電圧依存性



厚いトンネル障壁 ←→ 薄いトンネル障壁

図9、トンネル障壁変調による近藤温度のゲート電圧依存性

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, and Kazuhiko Matsumoto, "Chemical and biological sensing applications based on graphene field-effect transistors.", Biosens. Bioelectron. 26 (2010) 1727-1730. [doi:10.1016/j.bios.2010.08.001]
2. Yasufumi Hakamata, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Seiya Kasai, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto "Enhancement of weak-signal response based on stochastic resonance in carbon nanotube field-effect transistors.", J. Appl. Phys. 108 (2010) 104343. [doi:10.1063/1.3514540]
3. Yasufumi Hakamata, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Seiya Kasai, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Signal Enhancement Based on Stochastic Resonance in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors.", Proceeding of Fourth International Conference on Sensing Technology (2010) 1-5.
4. Takahiro Ohori, Satoshi Nagaso, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Single-Hole Charging and Discharging Phenomena in Carbon Nanotube Field-Effect-Transistor-Based Nonvolatile Memory.", Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 06GG13. [doi:10.1143/JJAP.49.06GG13]
5. Takaomi Kishimoto, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Logic Gates Based on Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with SiN_x Passivation Films.", Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 06GG02. [doi: 10.1143/JJAP.49.06GG02]

6. Tomoki Tsuji, Koichi Inoue, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, and Kazuhiko Matsumoto, "Raman Scattering of Single-Walled Carbon Nanotubes in Early Growth Stages Using Laser-Irradiated Chemical Vapor Deposition.", Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 06GJ03. [doi:10.1143/JJAP.49.06GJ03]
7. Kenzo Maehashi, Shin Iwasaki, Yasuhide Ohno, Takaomi Kishimoto, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Arrays on Patterned SiO₂/Si Substrates." Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 06GK01. [DOI: 10.1143/JJAP.49.06GK01]
8. Masuhiro Abe, Katsuyuki Murata, and Kazuhiko Matsumoto, "Dependence of sensitivity of biosensor for carbon nanotube field-effect transistor with top-gate structures.", J. Appl. Phys. 107 (2010) 084504. [doi:10.1063/1.3298904]
9. Kenzo Maehashi, Shin Iwasaki, Yasuhide Ohno, Takaomi Kishimoto, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Improvement in Performance of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors on Patterned SiO₂/Si Substrates.", J. Electron. Mater. 39 (2010) 376. [doi:10.1007/s11664-009-1002-1]
10. Toshio Kawahara, Satarou Yamaguchi, Kenzo Maehashi, Yasuhide Ohno, Kazuhiko Matsumoto, and Tomoji Kawai, "Cobalt Nano Particle Size Dependence of Noise Modulations in Relation to Nonlinearity.", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 8 (2010) 115-120 [doi:10.1380/ejssnt.2010.115]
11. Toshio Kawahara, Satarou Yamaguchi, Kenzo Maehashi, Yasuhide Ohno, Kazuhiko Matsumoto, and Tomoji Kawai, "Robust Noise Modulation of Nonlinearity in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors." Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 02BD11[DOI: 10.1143/JJAP.49.02BD11]

(4-2) 知財出願

①平成22年度特許出願件数(国内 1 件)

②CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)