



研究室紹介

## 大阪大学 産業科学研究所 量子機能科学研究部門 半導体量子機能科学研究分野

松本和彦\*

Osaka University, Institute of Scientific & Industrial Research  
Department of Semiconductor Electronics

Key Words : Nano Device, Carbon nanotube device, Quantum device

### 1. はじめに

本研究分野は、従来分子線エピタキシー法により成長した半導体の光物性を行う研究分野であったが、2003年より、カーボンナノチューブを中心にした研究内容へと新たな展開を行った。従来から半導体に用いられていたラマン分光法などの技術をカーボンナノチューブに応用してその特性制御を行うとともに、実際のデバイス応用への展開を計っている。現在の研究スタッフは、松本和彦教授、井上恒一助教授、前橋兼三助手、大野恭秀助手の4名であり、大学院生6名、学部生4名がそれぞれ異なる研究プロジェクトに取り組んでいる。また特定のプロジェクトについては、いくつかの企業や他大学との共同研究を行って遂行している。

### 2. 現在の研究内容

カーボンナノチューブの基礎から応用までをめざして、様々な角度から研究開発を行っている。カーボンナノチューブはその特異な形状と特殊な伝導特性により、様々な応用が考えられる。特異な形状としての高いアスペクト比を利用したプローブ応用や電極反応応用はその最たるものである。また特殊な伝導特性としては、単一電子特性、バリスティック伝導特性、次元量子伝導などがあげられる。これ

らカーボンナノチューブの量子伝導特性、電界効果トランジスタ特性を利用すると、従来の手法では達成不可能であった新たな領域が展開できると考えられる。以下に本研究室で行っているカーボンナノチューブを利用した研究の一部を紹介する。

#### 2-1. カーボンナノチューブトランジスタと特殊な伝導特性

図1は典型的なカーボンナノチューブトランジスタである。シリコンを熱酸化した基板上に、鉄あるいはコバルト触媒をフォトリソグラフィ技術で形成し、カーボンナノチューブを成長させる。成長後、金属電極を両端に形成して電流を注入するソース、ドレイン電極とする。またシリコン基板裏側に電極を設け、カーボンナノチューブを流れる電流を制御するゲート電極とする。本素子は通常のトランジスタ動作を行う。しかもカーボンナノチューブをチャネルとして用いるため、電流の流れる領域が極めて狭い為にゲート電圧の効果が非常に大きくなる。従来のシリコン素子の最高の特性よりもさらに2~6倍高い性能を示すことが分かり、将来性が非常に高いことが分かった。さらに本素子を詳細に測定すると、図2に示す様に電子や正孔を一個ずつ移動させることができる単一電子トランジスタや単一正孔トランジスタとして動作することも分かった。この機能を使えば、原理的に一個の電子、一個の正孔も検知できることを意味しており、超高感度なセンサーが容易に形成できることを示唆している。この特性もカーボンナノチューブのセンサー応用へ拍車をかけるものと期待される。図3は、カーボンナノチューブのバリスティック伝導特性を示すものである。図4に模式的に示す様に、4 $\mu$ mの長さのカーボンナノチューブ内部に電子、あるいは正孔の定在波が形成され、これによる量子準位が形成される。外部からカーボンナノチューブ内に流れ込む電流は、この量子準位



\*Kazuhiko MATSUMOTO  
1952年12月生  
現在、大阪大学産業科学研究所量子機能科学研究分野、教授、工学博士、半導体デバイス、ナノデバイス  
TEL 06-6879-8410  
FAX 06-6879-8414  
E-mail : k-matsumoto@sanken.osaka-u.ac.jp

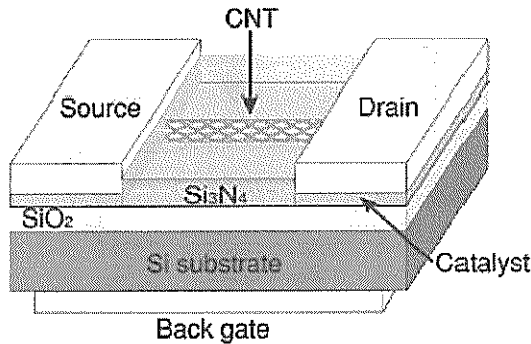


図1. カーボンナノチューブトランジスタの構造図

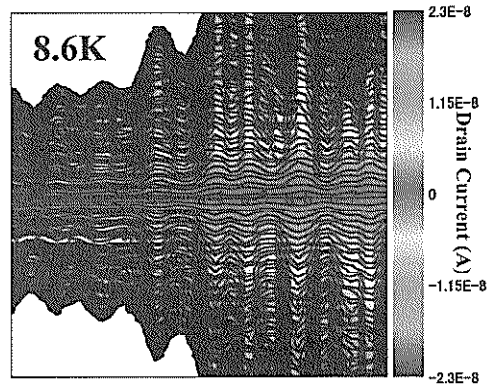


図2. 単一正孔トランジスタ特性

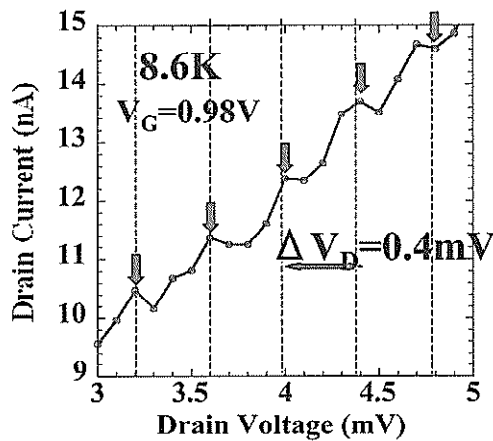


図3. カーボンナノチューブのバリスティック伝導特性

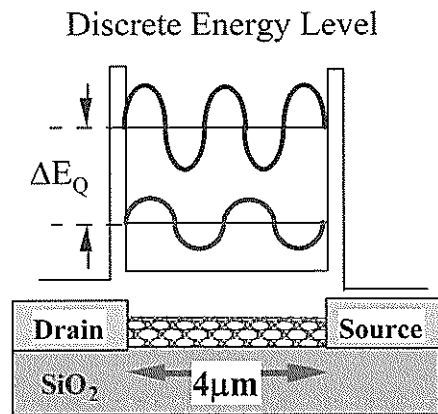


図4. カーボンナノチューブ内部に形成された定在波の模式図

があるところで大きな電流となり、図3に示すようなピーク電流を示すのである。驚くべきことは4 $\mu$ mという長い距離にわたって電子や正孔が散乱されることなくカーボンナノチューブ内部をバリスティックに伝導して定在波を形成することである。この特徴は他の物質にはない極めて特殊な伝導特性である。この特殊な伝導特性を何に利用すれば良いかが今後の課題の一つである。

### 2-2. バイオセンサー応用

カーボンナノチューブ電界効果トランジスタは従来のシリコントランジスタよりも高感度であることを前述した。この特長を利用してDNAの電気的検知を行うことが可能になった。予備的な実験の概要を図5に示す。カーボンナノチューブ電界効果トランジスタのバックゲートにプローブとなる1本鎖のターゲットDNAを固定化する。これを緩衝溶液中に設置

し、相補的な1本鎖のDNAを注入すると、2つの1本鎖DNAはハイブリダイゼーションを起し、2本鎖の正常なDNAを形成する。この際、DNAは多量の負電荷を有しているため、カーボンナノチューブチャネル内に多数の正孔を誘起し、電流を増加させる。従って電流をモニターすることにより、DNAのハイブリダイゼーション反応を検知することができる。しかもカーボンナノチューブ電界効果トランジスタが高い性能を有している為に、DNAの検知濃度は1 fmol/lという超低濃度まで検出できる高感度を有している。素子の最適化を計ることにより、より高感度特性が期待でき、将来のベッドサイドなどのPoint of Care Testingに応用できると期待される。

### 2-3. プローブ応用

図6は原子間力顕微鏡のカンチレバーを用いてカーボンナノチューブに欠陥を2つ導入する手法を示す。

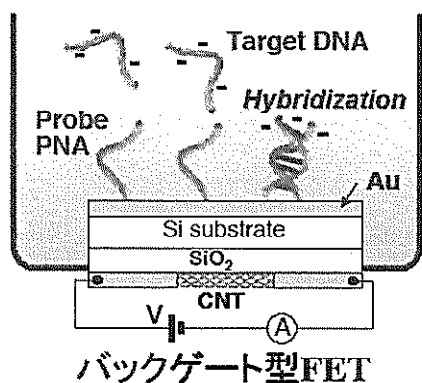


図5. カーボンナノチューブDNAセンサー

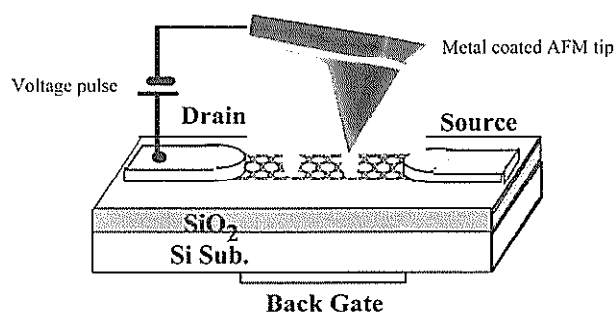


図6. 原子間力顕微鏡を用いてカーボンナノチューブに欠陥導入を行う。

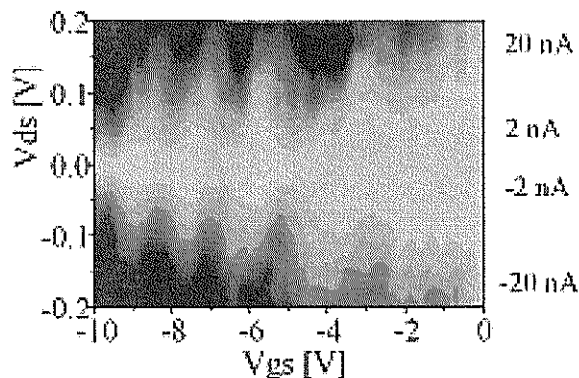


図7. カーボンナノチューブ室温動作単一電子トランジスタ特性

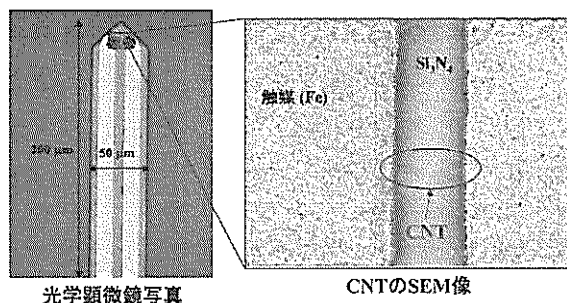


図8. 原子間力顕微鏡の先端に室温動作カーボンナノチューブ単一電子トランジスタを形成した単一電子プローブ定在波の模式図

カンチレバーに負、カーボンナノチューブに正の電圧を印加すると大気中の水分を介してカーボンナノチューブが陽極酸化され欠陥が生じる。この欠陥はトンネル接合として働き、2つの欠陥の間は～20nmの島領域となる。この微細な島領域に閉じ込められた電子は高いエネルギーを有する為に、室温においても電子を一個ずつ移動でき、単一電子トランジスタとして動作する。図7は室温における単一電子トランジスタ特性である。このようにカーボンナノチューブを用いると容易に単一電子トランジスタの室温動作が可能になる。このカーボンナノチューブ室温動作単一電子トランジスタを原子間力顕微鏡のカンチレバー先端に組み込んだものを図8に示す。この単

一電子プローブを用いれば原理的に一電荷の分布を室温で測定できることになり、半導体表面・界面、有機物質、バイオマテリアル等の電荷分布と機能の関連を解明できる手がかりとなることが期待される。

### 3. 今後の展望

カーボンナノチューブは以上述べた様に様々な特長を有し、従来の半導体では不可能であった特性を容易に実現することができる。しかしながら素子の再現性、不安定性などを完全に除去する必要がある、これらの問題を解決しつつ、カーボンナノチューブの特長を生かした実用化素子の研究開発を行って行く予定である。

この記事をお読みにになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。

事務局で著者と日程を調整して、お知らせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2ヵ月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6944-0604 E-mail [seisan@maple.ocn.ne.jp](mailto:seisan@maple.ocn.ne.jp)

必要事項：お名前，ご所属，希望日時(選択の幅をもたせてください)，複数人の場合はそれぞれのお名前，ご所属，代表者の連絡先

著者の都合でご希望に添えない場合もありますので，予めご了承ください。

