戦略的創造研究推進事業

ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づいた ナノデバイス・システムの創製」

研究課題「カーボンナノチューブ単一電子・スピン 計測システムの確立」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月~平成20年3月

研究代表者:松本和彦

(所属、役職)

大阪大学産業科学研究所 教授

1 研究実施の概要

本研究開発は、カーボンナ/チューブの特長を利用してデバイスを作製し、単一の電荷やスピンの計測をすることを目指した。またこれらカーボンナ/チューブデバイスをバイオセンサーや光センサーに応用してその高感度特性を得ることを目指した。これらを実現するためにカーボンナ/チューブの様々な成長制御技術や、カーボンナ/チューブに特有なデバイス作製プロセスを開発し、目的を達成した。

研究の全体の概要は、1)カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ、2)カーボンナノ チューブ量子デバイス、3)カーボンナノチューブ 成長制御、4)カーボンナノチューブ バイオセンサー、5)カーボンナノチューブ 光センサーに大別できる。各項目を以下に簡 単に紹介する。

1)のカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの研究開発においては、パッシベーション法の開発、 CNTFET における特性の時間変動、ヒステリシス問題の解決、仕事関数差による特性制御、CNT へのイオン注入法の開発と CNT FET 特性改善への応用を行った。

従来歩留まりの非常に悪かったカーボンナノチューブのパッシベーション法を、熱 CVD 法と CAT CVD 法を適用して開発に成功。これによりカーボンナノチューブ FET の特性改善と安定化を図ることが可能になった。

従来のカーボンナノチューブ FET は、そのドレイン電流が時間に対して20%以上も変動し、かつヒステリシス特性も数ボルトに及ぶなど、およそ実用化に耐えるものではなかった。従来この原因はカーボンナノチューブに付着した水や酸素であるといわれてきた。しかしこれらは原因の一部であり、本研究において、重要な変動要因はカーボンナノチューブに付着したレジスト残渣であることを突き止めた。この成果を元に、前記パッシベーション技術を活用してカーボンナノチューブに、酸素、水、フォトレジスト残渣が全く付着しないプロセスと構造を発案し、カーボンナノチューブFETのドレイン電流の変動を0.1%以下に抑え従来の100倍以上安定化させることに成功した。また、ヒステリシス特性においても1mVに抑制することに成功し、従来の1000倍以上改善に成功した。

以上の技術を元に、カーボンナノチューブFETのソース・ドレイン金属に、金属とカ ーボンナノチューブの仕事関数差が異なった金属を用いることにより、 p型、 n型を作り 分けることに成功した。

さらにカーボンナノチューブへのイオン注入技術の開発に世界で初めて成功した。これ により、カーボンナノチューブFETの特性をp型、n型と制御することが可能になり、 かつセルフアライメント構造の作製が可能になった。

2)のカーボンナノチューブ量子デバイスにおいては、様々な手法による単一電子トランジ スタの室温動作の達成、コヒーレンと伝導特性の観察と単一電荷の検出、カーボンナノチ ューブの一次元量子伝導の観察、カーボンナノチューブスピンバルブの作製に成功した。

カーボンナノチューブへ化学処理を施すことにより容易に室温動作する単一電子トラン ジスタを作製することを見出した。また原子間力顕微鏡のカンチレバーを用いてカーボン ナノチューブに陽極酸化で欠陥を2つ導入することにより、単一の島領域で動作する室温 動作単一電子トランジスタの作製が可能になることを示した。さらに島領域のサイズを陽 極酸化の位置を変えることにより可変にでき、そのチャージングエネルギーも室温におい てすら可変にできることを示した。これらの単一電子トランジスタを用いて、室温動作単 一電荷検知カンチレバーを作製した。

また欠陥の非常に少ないカーボンナノチューブでは、4μm にもわたって正孔がコヒーレンとに伝導することを発見した。またバイアス条件により、このコヒーレント伝導とクーロンブロッケード伝導が共存する特性の観察に成功した。コヒーレント伝導特性を利用して、単一の電荷のトラップによるランダムテレグラフノイズの観察に成功し、単一の電荷

の位置、エネルギーの同定に成功した。

従来カーボンナノチューブは、その状態密度が1次元であることが STS で確認されてき たが、量子化コンダクタンスの観察はされていなかった。本研究において、不純物を焼却 した清浄なカーボンナノチューブにおいて、階段状の電流の観察に成功し、これがショッ トーキーバリアを介した1次元量子伝導であることを初めて確認した。

カーボンナノチューブをチャネルとしたスピンバルブは既に報告されているが、従来は 同じ磁性金属をソース・ドレインに用いていたため、大きなオン・オフ比は得られていな かった。本研究において、異なった保持力を有する磁性金属をそれぞれソース・ドレイン に用いることにより、大きなオン・オフ比を得ることに成功した。

3)の カーボンナノチューブ 成長制御においては、カイラリティー制御レーザー消去法 の開発、 カイラリティー制御レーザーCVD 成長法の開発、および電界印加制御成長法の開 発を行った。

カイラリティー制御レーザー消去法では、特定の波長のレーザーを、大気中においてカ ーボンナノチューブ群に照射すると、このレーザーの波長のエネルギーと整合するバンド ギャップを有するカーボンナノチューブが、レーザーエネルギーを共鳴して吸収し、温度 が上昇して大気中で選択的に焼却されることを見出した。これは特定のカイラリティーを 有するカーボンナノチューブを選択的に除去できることを示している。これにより、初め てカイラリティーを制御することに成功した。

またレーザーCVD法を開発して、ある特定の波長のレーザーを照射してカーボンナノ チューブを成長すると、波長のエネルギーに対応したカイラリティーを有するカーボンナ ノチューブを選択的に成長できる可能性を得た。

2つ電極間に電界を印加してカーボンナノチューブを成長すると、成長方向が電界方向 と一致し、カーボンナノチューブの方向制御ができることを示した。さらに電流をモニタ ーすることにより、電極間に架橋したカーボンナノチューブを、一本づつ本数を制御して 成長できる技術を開発した。本手法の延長として、カーボンナノチューブを流れる電流を、 温度を変化させて測定すると、直接遷移の電子・正孔電流が観測され、この電流の温度依 存性よりカーボンナノチューブのバンドギャップが観測できることを初めて示した。

4)の カーボンナノチューブ バイオセンサーにおいては、カーボンナノチューブ FET に よるセンサーと、カーボンナノチューブ電極によるセンサーの開発に成功し、DNA、蛋 白質、アミノ酸、酵素の高感度検出に成功した。またカーボンナノチューブへのドライ化学 修飾法を開発した。

カーボンナノチューブ FET を用いたバイオセンサーでは、FETのバックゲート、ナノ チューブチャネルに直接、及びトップゲートに抗体あるいはアプタマー等を修飾すること により、バイオ物質の選択的、高感度検出に成功した。

カーボンナノチューブを電極に用いるセンサーでは、電気化学反応によるバイオ物質の 酸化電流を検出することにより、バイオ物質の検出に成功した。これはカーボンナノチュ ーブの巨大な表面積を活用したものである。これにより、アミノ酸、蛋白質、酵素の検出 に成功した。さらにµTASを作製し、マイクロポンプを作りこむことにより送液の自動化を 行い、より実用化に近いバイオセンサーの開発に成功した。

5)のカーボンナノチューブ 光センサーでは、カーボンナノチューブFETのシリコン基板に照射された光による電子・正孔対の電荷を検出することにより、室温において従来のシリコンフォトディテクターの感度の20倍、200Kにおいて160倍の高感度検出が可能であることを実証した。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

本研究開発は、カーボンナ/チューブの特長を利用してデバイスを作製し、単一の電荷やスピンの計測をすることを目指した。この為、研究の第一段階として、カーボンナノチューブの成長制御技術をして、カイラリティーの制御、成長方向の制御、成長本数の制御を目標とした。また基本デバイスであるトランジスタの安定性を実現する為の新しいプロセスの開発に取り組んだ。単一電子トランジスタの室温動作の実現の為の様々なプロセス開発と特性評価を行い、そのプロセスの過程でコヒーレント伝導、一次元量子伝導等の新たな研究展開が生まれた。カーボンナノチューブのバイオセンシング応用は、初期の段階では極めて不透明であったが、FET タイプのセンサーの開発を段階的に行う事により、定量性、選択制までを実証できるまでになった。また、このバイオセンサーの開発の過程で、初期には全く構想していなかったアンペロメトリックバイオセンサーの開発に取り組み、実用化に近いところまで達成できた。このように研究成果は多岐にわたり、非常に実り多い結果が得られたと言える。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 サブテーマ名1(大阪大学/産総研 松本グループ)
 (1)研究実施内容及び成果
 大阪大学と産総研のグループは、お互い連携を計って研究を推進した為に、両者の成果
 を切り分ける事は困難である。従って、両グループを一体として研究成果をまとめる。下記に目次を示し、この目次に沿って研究内容を詳述する。

<u>第1章 カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ(CNT FET)</u>

- 1-1 節 カーボンナノチューブ FET の特性改善と安定化
 - [1-1-1] パッシベーション法の開発(CAT CVD 法、熱 CVD 法)
 - [1-1-2] CNTFET における特性の時間変動、ヒステリシス問題の解決
 - [1-1-3] 仕事関数差による特性制御に成功
- 1-2 節 CNT へのイオン注入法の開発と CNT FET 特性改善への応用
 - [1-2-1] カーボンナノチューブ FET の閾値変化
 - [1-2-2] イオン注入とラマン分光による特性評価
 - [1-2-3] 埋め込みゲートカーボンナノチューブ FET による特性制御
 - [1-2-4] セルフアライメント構造カーボンナノチューブ FET

第2章 カーボンナノチューブ量子デバイス

2-1 節 カーボンナノチューブ室温動作単一電子トランジスタ

- [2-1-1] 化学処理による欠陥導入 [2-1-2] AFM による欠陥導入と室温動作単一電子トランジスタ [2-1-4] 室温動作単一電子カンチレバーの作成 2-2節 カーボンナノチューブのコヒーレント伝導 [2-2-1] 長大な半導体 CNT のコヒーレント伝導の観察に成功
- [2-2-2] コヒーレント伝導とクーロンブロッケード伝導の並立 [2-2-3] コヒーレント伝導による単一電荷検出 2-3 節 カーボンナノチューブの一次元量子伝導
- 2-4節 カーボンナノチューブスピンバルブ

第3章 カーボンナノチューブ 成長制御

- 3-1節 カイラリティー制御レーザー消去法の開発
- 3-2節 カイラリティー制御レーザーCVD 成長法の開発
- 3-3節 電界印加制御成長
- [3-3-1] 方向制御
 - [3-3-2] 本数制御
- [3-3-3] エネルギーギャップ導出

<u>第4章 カーボンナノチューブ バイオセンサー</u>

- 4-1 節 カーボンナノチューブ FET によるバイオセンサー
 - [4-1-1] バックゲート構造 CNTFET による DNA センサー
 - [4-1-2] CNT へのアプタマー直接修飾によるアレルゲンセンサー
- [4-1-3] トップゲート構造 CNT FET によるタンパク質センサー
- 4-2節 カーボンナノチューブ電極によるバイオセンサー
 - [4-2-1] 新しいセンサーの提案
 - [4-2-2] アミノ酸の検出
 - [4-2-3] 選択的タンパク質の検出
 - [4-2-4] 酵素の検出

第5章 カーボンナノチューブ 光センサー

<u>第1章 カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ(CNT FET)</u>

本章においては、カーボンナノチューブ FET の特性の安定化、改善をはかる手法として 開発に成功した、保護膜作製法、レジストフリープロセス、仕事関数差による特性制御、 イオン注入法の開発について述べる。

1-1 節 カーボンナノチューブ FET の特性改善と安定化

[1-1-1] パッシベーション法の開発 (CAT CVD 法、熱 CVD 法)

カーボンナノチューブ(CNT)は非常に微細な構造であるために、プラズマCVDの手法で 絶縁膜を形成すると、プラズマのエネルギーでほとんどの場合CNTが消滅してしまうという 問題があった。したがってCNTに欠陥等を導入せずにCNT上に絶縁膜を形成する手法は非常 に困難であった。このような状況に鑑み、本研究において、プラズマを用いず、熱CVD法と CAT CVD法の2つのCVD法を用いることにより、窒化シリコン保護膜がカーボンナノチューブ 上へ形成できることを初めて示した。これを用いてトップゲート構造電界効果トランジスタ の作成に成功した。



図1、(a)トップゲート構造カーボンナノチューブFETの平面写真。(b) トップゲー()構造 カーボンナノチューブFETの断面図。(3) トップゲート構造カーボンナノチューブ FETのn型特性。

図1(a)は、作成したトップゲート構造カーボンナノチューブを上面から顕微鏡で観察したもので、ソース・ドレイン金属電極があり、その間にトップゲート金属が、窒化シリコン絶縁膜を介して形成されている。ソース・ドレイン金属電極のゲート近傍の黒い領域は触媒である。トップゲートの下には、カーボンナノチューブチャネルが形成されている。この様子は、図1(b)の断面図を見ると容易に理解できる。400nmの酸化シリコン/シリコン基板上にカーボンナノチューブがソース・ドレイン間に形成され、200nmの窒化シリコン 膜を介してトップゲート金属が形成されていることが分かる。通常カーボンナノチューブは正孔が伝導する p 型特性を示す。ところが熱 CVD で窒化シリコン膜を 800 で形成したトップゲート構造カーボンナノチューブ FET では、図1(c)に示すように、ゲート電圧の増加とともにドレイン電流が増加する n 型特性を示す。これは、窒化シリコン膜形成時の高温の800 において、カーボンナノチューブに吸着した酸素が脱着して n 型を示したものと考えられる。

また CATCVD (フィラメント CVD) 法を用いると、65 および270 という超低温に おいて窒化シリコン膜を形成することが可能となる。65 の低温で窒化シリコン膜を形 成した場合、カーボンナノチューブ表面の酸素は脱離せず、したがってカーボンナノチュ ーブは p 型を維持したまま、保護膜を形成できる。また270 で窒化シリコン膜を形成 した場合、カーボンナノチューブ表面の酸素が脱離し、n型の特性を示す。さらに窒化シ リコン膜で表面を保護しているために、図2に示すように、p型もn型も大気中および真空 中においても特性はまったく同じで安定した特性を示すことが可能になった。以上の様に、 パッシベーション膜の作成方法を開発し、大気中において、真空中と変わらない安定性を



図2、(a) C A T C V D で 6 5 で形成した窒化シリコンを用いたトップゲート構造カーボ ンナノチューブ F E T の p 型特性。 (b) C A T C V D を用いて 2 7 0 で形成した窒 化シリコンを用いたトップゲート構造カーボンナノチューブ F E T の n 型特性。

[1-1-2] CNTFET における特性の時間変動、ヒステリシス問題の解決

従来、カーボンナノチューブをチャネルとした電界効果トランジスタは大きなヒステリシス特性と、 電流が時間経過に対して大きく変動するという問題を有しており、実用化の大きな妨げになってい た。 例えば図3(a)に示すようにドレイン電圧を-5V~+5V 往復印加すると、2~3V という巨大なヒ ステリシスを生じる。また図4(a)に示すように電流の時間変動は20~30%にも達する。これらの特 性の変動は、従来カーボンナノチューブの表面に付着した水と酸素の影響であるとの報告があっ た。しかしながら、カーボンナノチューブを700 の高温で加熱したのち窒化シリコン薄膜で保護し、 水、酸素を完全に除去したカーボンナノチューブ電界効果トランジスタにおいてもヒステリシス特性 は生じてしまうことを見出し、水、酸素の除去のみでは特性の安定化に充分でないことが分かった。 本研究において、この不安定性の原因はデバイス作製中にカーボンナノチューブ表面に付着する フォトレジストであると予測し、カーボンナノチューブと金属電極界面、およびカーボンナノチューブ チャネル表面にフォトレジストが一切付着しないプロセスを開発した。これにより、トランジスタのヒス テリシスはドレイン電圧の-5V~+5V 往復印加において図3(b)に示すように 1mV までに抑制する ことが可能になった。この値はシリコン MOSFET の値と同等であり、実用化への道筋をつけたと言 える。また電流変動も、本プロセスを用いると図4(b)に示すように、0.1%以下に抑制できた。これ により、カーボンナノチューブトランジスタの大幅な安定化に初めて成功した。本手法は世界で初 めてであり、未だ本結果を追試できるグループはない。



図 3 (a) 従来の CNTFET の電流履歴特性 図 3 (b) 本 CNTFET の電流履歴特性



[1-1-3] 仕事関数差による特性制御に成功

従来、カーボンナノチューブは、いかなる電極金属を用いても p 型特性しか示さないと いう問題があった。これはカーボンナノチューブと電極金属の界面に吸着した酸素がダイ ポールを形成し、カーボンナノチューブのバンドを下方へ曲げてしまう為であると解釈さ れていた。本研究において、[1-1-2]において示したように、カーボンナノチューブに、酸 素、水、レジスト残渣の全く付着しないプロセスの開発に成功している。これを用いてソ ース / ドレイン電極に仕事関数の違う金属を用いて特性を評価した。カーボンナノチュー ブよりも仕事関数の大きな白金を用いると、白金のフェルミレベルがカーボンナノチュー ブの価電子帯に近い為に正孔が注入され、p 型特性を示した。逆にカーボンナノチューブよ りも仕事関数の小さなチタンを用いると、チタンのフェルミレベルがカーボンナノチュー ブの伝導帯に近い為に電子が注入され、n 型特性を示した。

これにより、初めて正確な仕事関数差に基づく p、n 制御が可能になった。仕事関数の極め て小さな Ca で n 型を達成した例はあるが、本研究のように正確な仕事関数差で p、n 制御 をした例は未だ出ていない。



図 5 (a) CNT より仕事関数の大きな白金を使用した場合のバンド構造と p 型 FET 特性。(b)

CNT より仕事関数の小さいチタンを使用した場合のバンド構造とn型 FET 特性。 1-2節 CNT へのイオン注入法の開発と CNT FET 特性改善への応用

[1-2-1] カーボンナノチューブ FET の閾値変化

通常カーボンナノチューブは大気の酸素に触れることにより、p型伝導を示すことが知られている。しかしながらカーボンナノチュープを電子デバイスの基本要素として用いる場合はn型伝導も必要不可欠である。本研究では、グラフェンシートの炭素の置換エネルギーに相当する25eVという超低エネルギーで酸素をイオン注入する手法を開発した。これによりカーボンナノチューブに酸素イオンをイオン注入したところ、図6(a)に示すようにイオンドーズの増加に伴い、電子伝導が増加し、閾値電圧が負側にシフトするn型伝導特性を示すことが分かった。さらにEELS測定により、イオン注入後、π結合、σ結合のピークがプロードになり、原子半径の大きな酸素が炭素に置換され、CNTの結晶構造に歪みが生じていることが分かった。この手法は、次項目以下で詳細に示すように、従来なかったカーボンナノチューブへの新しいドーピング法の開発に成功したものである。





(b)

(a)

図6 (a)、イオン注入による CNTFET の閾値変化とp型 n型変換。

図6 (b)、イオン注入前後によるカーボンナノチューブの EELS 測定結果。

[1-2-2] イオン注入とラマン分光による特性評価

単層カーボンナノチューブに酸素を25eV、10¹¹-10¹³ions/cm²のドーズ量でイオン注入し、 イオン注入前後のラマン散乱をストークス散乱とアンチストークス散乱の両方で測定した。 図7に示すように、イオン注入によりラマンピークが新たに生じるもの、消失するもの、変 化のないものなど、ストークス側とアンチストークス側とで様々な強度の振る舞いが観測さ れた。これはラマン共鳴を起こす準位の変化を意味する。イオン注入により単層カーボンナ ノチューブの置換位置に酸素原子が入ると期待されるが、その構造の安定性を第一原理計算 により確認した。ラマン共鳴準位を知るため、60個の炭素原子に1個の割合で酸素が置換 したとしてバンド構造を計算し、図8に示すようなバンド縮退の分裂を明らかにした。この バンド構造を用い、さらに希薄な500分の1の酸素不純物を含む単層カーボンナノチューブ の共鳴遷移をCPA近似を用いて計算し、図9に示す結果を得た。この結果はラマン共鳴の変 化を説明する。以上よりイオン注入により炭素が酸素に置換され伝導特性が変化する事が明 らかになった。



図8イオン注入前後のCNT のバンド端の構造変化。

図 9,酸素を含むバンドと光遷移スペクトル計算 酸素不純物によりバンドの縮退が解け遷移エネ ルギーがシフトする。

[1-2-3] 埋め込みゲートカーボンナノチューブ FET による特性制御

カーボンナノチューブへのイオン注入の効果をより明確にする為に、図10に示す様な 埋め込みゲートカーボンナノチューブトランジスタを作製し、酸素のイオン注入前後での 特性変化を調べた。バックゲートは、ソース/ドレイン電極のショットキーバリアを低減 し、電子/正孔が注入しやすいようにバイアスする為に用いる。バックゲートを負に大き く印加すると、イオン注入前は大きな正孔電流が得られるが、イオン注入後、この正孔電 流は大きく減少する。またその閾値がより負側へ 6V シフトする(正孔が少なくなる方向)。 バックゲートを正に大きく印加すると、イオン注入前は電子電流はほとんど観察されない が、イオン注入後、電子電流が大きく増大する。また閾値電圧が同様に負側へ 6V シフトす る。以上の結果から、酸素のイオン注入により、カーボンナノチューブが p 型特性から n 型特性を示すようになった事が明らかである。図12はイオン注入前後でのバンド構造を 示す。従って酸素のイオン注入はカーボンナノチューブの伝導特性を変化させる為に有効 な手段である事を実証できた。

図 10, 埋め込みゲート CNTFET の構造図。 酸素のイオン注入を行う。









図 12, イオン注入前後での埋め込みゲート CNTFET のバンド構造

[1-2-4] セルフアライメント構造カーボンナノチューブ FET

[1-2-3]に示した手法では、大気に暴露したカーボンナノチューブにイオン注入をしてしる。従って、吸着酸素の影響と、イオン注入酸素の影響との差異が明瞭でなかった。本項目では、カーボンナノチューブチャネルを真空中で昇温して酸素を脱離し、かつ絶縁膜で保護することにより、大気からの吸着酸素の影響を除去した。その上で、絶縁膜を通したスルーイオン注入でカーボンナノチューブに酸素およびボロンをイオン注入する技術を開発した。さらにこれを利用して、カーボンナノチューブ FET のソース抵抗を低減できるセルフアライメント構造を実現した。

図 13 は、カーボンナノチューブに窒化シリコン絶縁膜を Cat-CVD で 10nm 形成し、その上から酸素、あるいはボロンをスルーイオン注入する手法を示したものである。n 型バックゲート CNTFET に酸素をイオン注入した場合、イオン注入前後で閾値がより負側にシフトし、飽和電子電流の増加が得られ、イオン注入した酸素が n 型のドナーとして働いていることを実証した。 さらに本手法を利用して、図 14 に示すトップゲート構造セルフアライメント型 CNT FET を作製した。CNT FET は p 型であり、SiN の膜厚は 10nm である。この FET のソース / ゲート間にボロンを Ion energy 250 eV で dose 量 4.9×10¹¹ ions/cm² イオン注入した。ボロンはカーボンナノチューブにアクセプタとして働く。イオン注入前後の FET 特性を比較すると、正孔ドレイン電流の増大が観測され、ソース抵抗の低減がイオン注入で計られている事が実証できた。

以上にから、イオン注入技術によりカーボンナノチューブ FET の特性制御、および特性改善ができることを初めて実証した。この技術は未だ世界で初めてである。



図 13, バックゲート CNTFET へのスルーイオン注入。 図 14,イオン注入によるトップゲート構造セルフアライメント型 CNT FET とイオン注入前後での特 性改善。

第2章 カーボンナノチューブ量子デバイス

本章においては、様々な量子デバイスの作製、特性測定に成功した結果を示す。カーボ ンナノチューブの微細性を活用した単一電子トランジスタの様々な室温動作達成法、従来 の半導体では考えられない長い距離にわたるコヒーレント伝導の観察と単一電荷計測の成 功、一次元量子伝導の観察とスピンバルブの特性について述べる。

2-1 節 カーボンナノチューブ室温動作単一電子トランジスタ

[2-1-1] 化学処理による欠陥導入

ソース・ドレイン電極間に成長した半導体カーボンナノチューブに化学処理により欠陥 を導入し、実効的に数ナノメートルの微細ドットを形成することにより、室温で動作する 単一電子トランジスタの作成に成功した。図15は9k~300Kにおけるクーロンダイアモン ドの温度依存性を示す。半導体カーボンナノチューブでは、空乏領域直前に正孔によるク ーロンダイアモンドと電子によるクーロンダイアモンドが観察され、前者は室温まで観察 された、後者は200Kまで観察された。このクーロンブロッケード効果は、図16に模式的 に示すように価電子帯と伝導体に化学処理による欠陥が導入され、これがトンネルバリア として動作しする為のものである。クーロンブロッケードが解けた領域のドレイン電流の ドレイン電圧依存性を低温で観察すると、図17に示すように、量子ドットによる微分負 性抵抗特性が得られた。この周期より、ドットサイズが8nmと見積もられ、これはクーロ ンギャップから見積もったドットサイズと一致する。このようにカーボンナノチューブを 利用すると室温動作する単一電子トランジスタを容易に形成できることが分かった。



図15、化学処理により欠陥を導入したカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの 9k~300Kにおけるクーロンダイアモンドの温度依存性。正孔のクーロンダイアモンドが室温 でも観察されている。



図 16,価電子帯と伝導体に化学処理による欠陥が導入され、トンネルバリアとして動作し、 単一電子特性を示す。



図 17,9K におけるクーロンブロッケードが解けた領域のドレイン電流のドレイン電圧依存 性。共鳴トンネルによる量子準

[2-1-2] AFM による欠陥導入と室温動作単一電子トランジスタ

[2-1-1]で述べた化学処理による欠陥導入 法では、欠陥の位置、個数、サイズを規定できないために再現性のよい特性を得ることは困難である。ここでは原子間力顕微鏡(AFM)のカンチレバーによる陽極酸化法を用いて、指定した位置に欠陥を導入する技術を開発し、

これを用いて単一ドット構造の室温動作単一電子トランジスタを作成することに成功した。 図18は原子間力顕微鏡の白金コートしたカンチレバーを陰極として、カーボンナノチュ ーブを陽極酸化して欠陥を2つ導入する手法を示す。この欠陥がトンネル接合となり、かつ 2つの欠陥の間の領域が単一電子トランジスタの島領域として働く。2つの欠陥の間隔は 22nmと15nmである。図19は欠陥の間隔が22nmの試料を室温で測定したクーロンダイアモ ンド特性である。クーロン振動の周期は1.7V、クーロンギャップは70~130mVである。クー ロン振動の周期が非常に規則正しく、これは単一の島領域の単一電子トランジスタ特性で あることを示している。



欠陥の間隔が22 nmと15nmの試料のクーロン振動特性を図20に示す。クーロン振動の周期 は欠陥の間隔、すなわち島領域のサイズが小さくなるに従い大きくなることがわかる。こ れは島領域のサイズが小さくなると、島領域の容量が比例して小さくなり、その逆数に比 例するクーロン振動の周期が大きくなることに対応している。実際の島領域のサイズは、 カンチレバーの曲率半径が20~50 nmと大きいため、島領域のサイズとしては大きな誤差を 伴うことに注意が必要である。

以上のようにAFM陽極酸化法を利用する事により、制御性よくカーボンナノチューブに欠陥を導入する事に成功し、非常に周期的な単一電子トランジスタの室温動作に成功した。 同様にFIBを用いて欠陥を2つ導入し、室温動作にも成功した。詳細は割愛する。 [2-1-4] 室温動作単一電子カンチレバーの作成

バイオ物質、半導体表面、有機物表面の電荷分布を単一の電荷の単位で詳細に測定することが可能になれば、様々な新しい情報がえられ、物理、生物等の研究に大いに寄与することができると考えられる。

本研究においては、カンチレバー先端にカーボンナノチューブを成長して欠陥を導入し、 室温動作単一電子トランジスタをカンチレバー先端に作りこむことに成功した。 図22に 単一電子トランジスタカンチレバーの模式図を示す。カンチレバー先端に位置するところに 鉄触媒をフォトリソグラフィーで形成しカーボンナノチューブを成長する。カーボンナノチ ューブ成長後、ソース・ドレイン金属を形成し、その後、引き出し電極を形成する。基板は 酸化シリコン / 窒化シリコン / シリコン基板を用いている。電極形成後、シリコンプロセス を利用して基板エッチング等を行い、カンチレバーを作りこむ。図23は、シリコンプロセ スを用いて作成中のカーボンナノチューブカンチレバーの光学顕微鏡写真とその断面図を 示す。図24(a)は完成した単一電子カンチレバーの光学顕微鏡写真であり、そのカンチレバ ー先端のカーボンナノチューブの電子顕微鏡写真を図24(b)に示す。一本のカーボンナノチ ューブが電極間に架橋していることが分かる。図24(c)に、このカンチレバー先端に形成さ れた単一電子トランジスタの室温における特性を示す。明瞭なクーロンダイアモンド特性が 得られており、室温動作していることが分かる。以上の様に、室温動作する単一電子カンチ レバーの作製に成功した。

しかしながら本カンチレバーの構造ではカーボンナノチューブの位置と表面電荷を測定 すべき試料との距離が遠いため、単一の電荷を測定することができないことが判明した。(後 述する[2-2-3] コヒーレント伝導による単一電荷検出の項において、電荷とナノチューブ の距離は1nm前後である必要があることがわかる。)

この問題解決の方法の第一段階として、トップゲート構造のカーボンナノチューブFE Tをカンチレバー先端に作りこみ、かつFIB中でアモルファスカーボンを堆積させて急 峻なチップ先端を作成し、その感度の差を調べた。図 25(a)はトップゲート構造カーボンナ ノチューブFETプローブの顕微鏡写真である。カンチレバー先端にカーボンナノチュー ブを成長後、電極を形成し、その後熱CVDで窒化シリコン絶縁膜を形成する。最後にト ップゲートを形成する。図 25(b)はバックゲートプローブと今回作成したトップゲートプロ ーブのドレイン電流のゲート電圧依存性である。バックゲートプローブの相互コンダクタ ンスはわずか 3.54nS であるのに対し、トップゲート構造では 428nS と120 倍もの高い値 が得られ、トップゲート構造が必須であることがわかった。この差は主に絶縁膜厚さの違 いに起因すると考えられる。従って、単一電子カンチレバーにおいても、カーボンナノチ ューブで形成されている単一電子トランジスタの島領域上に薄い絶縁膜を介して、表面電 荷を測定する試料に近接可能なチップを有する構造が必須であることが判明した。



図23,シリコンプロセスを利用した作製中の単一電子カンチレバーと断面図



 光学顕微鏡写真
 CNTOSEM®
 gate voltage (V)

 (a)
 (b)
 (c)

 図24(a),単一電子カンチレバーの光学顕微鏡写真。図24(b),カンチレバー先端のカーボンナ

 ノチューブの電子顕微鏡写真。図24(c),室温における単一電子トランジスタ特性。



(a)

(b)

図25(a)、トップゲート構造カーボンナノチューブFETプローブの顕微鏡写真。図25(b)、 トップゲート構造とバックゲート構造CNTFETの相互コンダクタンスの比較。

2-2節 カーボンナノチューブのコヒーレント伝導

[2-2-1] 長大な半導体 CNT のコヒーレント伝導の観察に成功 欠陥のない4µmのカーボンナノチューブを用いて図26に示す3端子素子を作成すると、真 空中の8.6Kにおいて、図27に示すような周期的なクーロンダイアモンド特性が得られる。 これは4µmのカーボンナノチューブ全体を島領域とし、ソース・ドレイン電極下のショッ トキーバリアをトンネル接合とする単一正孔トランジスタ特性である。クーロンダイアモ ンド特性から、カーボンナノチューブチャネル内の正孔が、ゲート電圧を変化させること により、n個からn-7個まで一個づつ変化していく様子が明瞭に観察される。

さらにこのクーロンブロッケード現象が解けた領域のドレイン電流-ドレイン電圧特性 では図28に示すように、0.4mVという非常に小さな周期で、周期的な負性抵抗特性が得られ る。これは図29に示すように、ソース/ドレイン端のショットキーバリアがトンネル障壁 として働き、カーボンナノチューブチャネル全体が量子井戸を形成し、量子準位を形成す る。この量子準位を介して正孔の共鳴トンネルが生じ、ドレイン電流に振動が生じている のである。この電流振動の周期から、図29に示されている式を用いて量子井戸幅を見積も ると4µmになる。これは、クーロンダイアモンド特性から見積もった値、および実際に作 製した素子の電子顕微鏡写真から測定した値と一致する。別の言い方をすると図28の特性 は、正孔が4µmに渡って波動性を保ってコヒーレントに伝導していることを意味する。 驚くべきことに、半導体カーボンナノチューブのコヒーレント長は4µm以上であるということである。これは従来の半導体にはない、カーボンナノチューブ特有の性質である。

さらに本特性を確認するために、図28の特性を示す素子のチャネル長(4µm)より3倍 短いチャネル長(1.4µm)の素子を作製して同様の測定をした。この素子では図30に示す ように同様にドレイン電流に明瞭な振動が現れ、その周期は、図28の特性に比べて3倍大 きな0.4mVの周期を示した。これは図29の式からも明らかなように、量子井戸の幅と量子準 位間隔は反比例するため、量子井戸の幅が1/3になったために、量子準位間隔が3倍になり、 共鳴トンネル電流の振動周期が3倍になったものである。以上の結果から、カーボンナノ チューブ全体を量子井戸とする共鳴トンネル伝導、別の言い方をすれば、4µmにわたる 正孔のコヒーレント伝導の観察に成功したと言える。

従来、金属カーボンナノチューブでは理論的にコヒーレント長が長いことが予測され、 かつ実験でも電子の500nmのコヒーレント伝導が確認されていた。本研究では、初めて半導 体ナノチューブにおいて、しかも正孔においてもコヒーレント伝導が生じ、そのコヒーレ ント長が4µmにわたることを実証した。この4µmのコヒーレント長はカーボンナノチ ュープで観測された中で最長である。



図29、4µm長CNT全体を量子井戸とする量子準位の形成。



図 30、1.4µm 長 CNT 全体を量子井戸とする共鳴トンネル負性抵抗。 井戸幅(カーボンナノチューブチャネル長)が3倍小さくなるため、共鳴トンネル電流の ピーク周期は、3倍大きな1.2mV となる。

[2-2-2] コヒーレント伝導とクーロンブロッケード伝導の並立

カーボンナノチューブトランジスタ構造において、正孔のクーロンブロッケード伝導現 象とコヒーレント伝導現象が共存し、その現象が遷移していく様子を初めて観察すること に成功し、かつその原因を明らかにした。従来、カーボンナノチューブトランジスタにお いて、クーロンブロッケード伝導現象とコヒーレント伝導現象は、それぞれ個別に観察す ることに成功しており、それぞれは別の現象と理解されていた。ところが本研究成果によ り、一つのデバイスにおいて測定条件を変えることにより、クーロンブロッケード伝導領 域からスムーズにコヒーレント伝導領域に遷移して行き、その境界で両者の共存現象が生 じることを発見した。





図 32、ドレイン電流のゲート電圧依存性。ゲート電圧が0V 近傍では、正孔が一つずつカ ーボンナノチューブに入るクーロン振動特性が現れている。ゲート電圧が-5V~-25V では、 このクーロン振動に重畳した周期の小さなコヒーレント伝導の電流振動が現れている。

デバイスの構造図を図 31 に示す。酸化シリコン / シリコン基板上のソース・ドレイン電極間に一本の単層カーボンナノチューブが架橋成長されており、シリコン基板の裏側にゲート電極が形成されている。チャネルであるカーボンナノチューブの長さは電子顕微鏡写真より 73nm である。このデバイスのドレイン電流のゲート電圧依存性を図 32 に示す。ゲート電圧が 0~5V 近傍で鋭いピークが現れている。

これは、一個ずつ正孔がカーボンナノチューブに入ることによるクーロン振動ピークである。さらにゲート電圧を負に増していくとクーロン振動のピークに多くのノイズ様の特性が生じてくる。この領域を拡大すると、図32の右側に示すように小さな周期の電流振動が、大きな周期の電流振動に重畳されていることが分かる。

大きな周期の電流振動は、正孔がカーボンナノチューブに一つずつ入る際に生じるクーロン振動である。小さな周期の電流振動は、正孔が波の性質を保存(すなわちコヒーレント性を保存)して 73nm という巨大な長さのカーボンナノチューブ全体にわたって定在波を形成し、これによる量子準位を介した共鳴伝導による電流振動である。さらにゲート電圧を負に印加していくとクーロン振動は不明瞭になり、最後にはコヒーレント振動のみになる。

これらの現象は、ゲート電圧により、ソース・ドレイン電極のショットキーバリア高さ が変化することにより生じる。ゲートバイアスが0V近傍の場合は、バリア高さが充分にあ り、バリア抵抗が量子抵抗より充分高い為、正孔はカーボンナノチューブ内部に閉じ込め られ、クーロンブロッケード現象が生じる。ゲート電圧を負に大きく印加していくとバリ ア高さが低くなり、バリア抵抗が量子抵抗より小さくなる。その場合、正孔をカーボンナ ノチューブに閉じ込めておくことが困難になり、クーロンブロッケード現象は弱まる。し かしショットキーバリアはいまだトンネルバリアとしては機能するため、量子準位は形成 できコヒーレント伝導は保存される。

従来の半導体では得られない、巨大な長さのコヒーレント伝導とクーロンブロッケード 効果が、カーボンナノチューブでは容易に得られ、かつそれらが共存するという現象を初 めて発見した。 さらにこれら両伝導現象がゲートバイアスで遷移することを初めて明らか にした。これらの成果は、従来の半導体ではなし得ない新たな伝導特性制御デバイスの出 現を示唆するものである。 [2-2-3] コヒーレント伝導による単一電荷検出

上記[2-2-2]で、カーボンナノチューブの正孔のコヒーレント伝導を示した。本特性を利用する事により、カーボンナノチューブ近傍のトラップに一個ずつ捕獲される電荷の位置 とエネルギーを算出する事が可能となる。

図 33 は 73nm のカーボンナノチューブチャネルを有する素子の、正孔のコヒーレント共 鳴伝導特性である。周期的な電流振動が得られており、その周期は 0.65V である。この周 期から算出したチャネル長さは、SEM 観察して得られたナノチューブの長さとほぼ一致する。 図 34 は、同様の特性を、ゲート電圧と



図 34、正孔のコヒーレント共鳴伝導特性のゲート電圧 / ドレイン電圧依存性

ドレイン電圧に対してプロットしたものである。ゲート電圧、ドレイン電圧の双方でフェルミ準位を変調できるため、両電圧でドレイン電流が周期的に振動している事がわかる。 このコヒーレント振動を利用して、電荷の検出を行う事ができる。図 35 は、コヒーレント 電流の時間依存性である。カーボンナノチューブ近傍の一個の電荷のトラップによるラン ダムテレグラフノイズが観察される。それぞれのレベルが現れる確立を P₁, P₂ とする。こ の確率の比、In P₂ /P₁をゲート電圧の関数としてプロットすると、図 36 に示すように直線 に乗る。トラップ準位とナノチューブのフェルミレベルの差をΔE とすると、一個の電荷が ナノチューブとトラップとに存在する確率比 In P₂ /P₁は(1)式で表される。



図 35、コヒーレント電流の時間依存性。ランダムテレグラフノイズが観察される。それぞれの電流ピークレベルが現れる確率を P₁, P₂とする。



図 36、ランダムテレグラフノイズの電流ピークの確率比 In P₂ /P₁のバイアス依存性と、ト ラップのモデル。

$$P_{n+1}/P_n = (g_{E_V}/g_{E_t})e^{\beta(E_V-E_t)} = Ae^{\beta\Delta E}$$
 (1)

ここでβ= 1/kT であり、g_{EV}, g_{Et}: はトラップ、ナノチューブの縮退度であり簡単の為に g_{EV} - g_{Et} と仮定する。 $\Delta E = \alpha e(V_0 - V_c)$ と表され、印加ゲート電圧により変動する。従って、(1)式は

In (*P*_{*n+1*}/*P*_{*n*})=βαε(*V*₀-*V*₆) (2) と変形でき、確率比 In P₂ /P₁が、図 36 に示すようにゲート電圧にリニアに比例することが わかる。図 36 の傾きと(2)式より、トラップサイトとカーボンナノチューブのフェルミ レベルの差が 0.17eV と、見積もられ、かつその位置がナノチューブ近傍の 1nm である事が 算出できた。

本手法により、コヒーレント伝導を利用して一個の電荷を検出し、そのエネルギーレベ ルと位置を確認する事が可能になった。

2-3節 カーボンナノチューブの一次元量子伝導

カーボンナノチューブは理想的な一次元構造を有し、その状態密度も STS 測定により一次元状 態密度構造を示すこともすでに実証済みであるにもかかわらず、その伝導特性で量子コンダクタン スの階段特性を示した報告例はない。

本研究において、初めてカーボンナノチューブの量子コンダクタンスの階段特性を観察する事に 成功した。カーボンナノチューブをチャネルとするトランジスタ構造において超高真空中で高電流 を印加、加熱することによりカーボンナノチューブ表面の酸素を完全に脱離する。その後、この素 子に最適なドレイン電圧とゲート電圧を印加すると、図 37 に示すように、ドレイン電流はゲート電圧 に対して階段特性を示した。ところがこのドレイン電流の階段特性は、量子コンダクタンスの値より 遥かに小さな値である。かつドレイン電流の階段特性は、図 37 に示すようにゲート電圧に対して、 exponential で増加し、あるゲート電圧でほぼ一定のドレイン電流になる階段状特性を示す。ゲート 電圧の増加によりこの階段特性を繰り返す。本研究では3つの階段特性まで得られた。このコンダ クタンスは一定の量子コンダクタンスの値にはならない。

この理由は金属電極 / カーボンナ / チューブ界面のショットキーバリアにおいて、トンネルする正 孔がそのショットキーバリア幅で制御されていることに由来する。図 38 の左図に示すように、金属 電極のフェルミレベルがカーボンナ / チューブの一次元状態密度のピークに一致すると、高い電 子密度によりフェルミレベルはこの位置にピンニングされ、ゲート電圧を増加させてもショットキーバ リア幅はほとんど一定となる。従ってドレイン電流のゲート電圧に対する増加は鈍り一定の値となり 階段特性が出現する。さらに大きなゲートバイアスを印加してこの状態密度のピーク位置を離れる と、通常のショットキーバリアの振る舞いになり、正孔はバリアを介してトンネルするため、

exponential な電流増加を示 す。このようにして、階段電流 特性が生じると考えられる。

図 37,カーボンナノチュー

ブの階段電流特性





図 38、ショットキーバリアと、金属電極のフェルミレベルの位置と、ナノチューブの一次 元状態密度のピーク位置との関係。



図 39、仮定した理想的な状態密度

図 40、ショットキーバリアをトンネルするキャリアのトンネル確率のゲートバイアス依存性

以上の仮定を簡単な計算により実証した。図 39 に示す様な理想的な一次元の状態密度を 仮定し、ショットキーバリアをトンネルするキャリアのトンネル確率のゲートバイアス依存性を計算し たところ、図40に示すように、exponential 的な電流の増加と階段特性を示し、実験結果をよく表す ことが分かった。

本研究により初めてカーボンナノチューブの一次元状態密度を示す伝導特性が得られた。

2-4節 カーボンナノチューブスピンバルブ

カーボンナノチューブのコヒーレント伝導特性を利用すれば、効率の高いスピンバルブの形成が 可能になると考えられる。従来カーボンナノチューブをチャネルに用いたスピンバルブでは、図 41 に示すようにソース・ドレイン電極金属に同じ磁気金属(例えばコバルト)を用いていた。したがっ て原理的には同じ保磁力を有するためにスピンバルブは形成されないはずであるが、ソース・ドレイン金属のいずれかの電極の微小なドメインの磁化反転により、スピン反転が生じるとされてきた。 この手法では充分高いオン・オフ比のスピンバルブが形成できなかった。図41で得られたオン・オフ比はわずか2%であった。本研究において、図42に示すように、ソース・ドレインにそれぞれコバルトと鉄という保磁力の異なった磁気金属を用いスピンバルブを形成した。チャネル長は500nmとした。外部磁場を-500mT ~ +500mT 往復印加することにより、スピンバルブ特性が得られ、そのオン・オフ比は35%にも上った。またネール効果によると思われるピーク位置のシフトも観察された。この手法により、高いオン・オフ比を有するスピンバルブの作製が可能になった。チャネル長のより微細化により、より高い特性が得られると期待される。



図 41、同じ磁性電極によるスピンバルブ特性

図 42、異なる保持力を有する磁性電極によるスピンバルブ特性

第3章 カーボンナノチューブ 成長制御

3-1節 カイラリティー制御レーザー消去法の開発

従来 CNT の最大の問題点はそのカイラリティーを制御できないことであった。本研究に おいて、CNT のカイラリティーが異なるとバンド構造が異なることを利用し、レーザ・を大 気中で共鳴吸収させて選択的に CNT を焼却除去しカイラリティーを制御することに初めて 成功した。図 42 に、カイラリティー制御レーザー消去法の結果を示す。最初に3種類の波 長のレーザーを用いてラマン測定を行う。その後、波長 514.5nm のアルゴンレーザ・を強い パワーで大気中で照射して CNT を焼却除去する。再度3種類の波長のレーザーでラマン測 定を行った。図 43 には、アルゴンレーザ・を強いパワーで照射する前後でのラマン測定結 果の比較を示している。波長 514.5nm に共鳴するカイラリティーを有するピークが半減し ているが、他のカイラリティーのピークはほとんど変化していないことが分かる。これに より、波長 514.5nm に共鳴するカイラリティーを有するカーボンナノチューブのみを選択 的に除去することに成功した事がわかる。



図 43、レーザ・共鳴吸収を用いたカイラリティーの制御法

3-2節 カイラリティー制御レーザーCVD 成長法の開発

カーボンナノチューブをデバイスに応用するためには、カイラリティーを制御して成長 することが必要不可欠の課題である。本研究においてレーザーを照射することによりカー ボンナノチューブを成長するレーザーCVD 法を開発し、カイラリティーを制御して成長で きる予備的知見を得た。

レーザーCVD 法の原理を図 44(a)に示す。真空チャンバー内部にシリコン基板上に触媒の 形成された試料を設置し、エタノールガスを供給する。ついで波長 325 nm の He-Cd レー ザー、および波長 514.5 nm の Ar レーザーを 1 分間照射してカーボンナノチューブを成長 する。その後、波長 514.5 nm と 457.9 nm の Ar レーザーでラマン分光測定を行った結果を 図 44(b)に示す。図から明らかな様に、波長 514.5 nm のラマン分光測定結果では、325 nm 波長のレーザー成長のみに、135 cm⁻¹ と 165 cm⁻¹ に顕著な共鳴ラマンピークが観測される。 しかし 457.9 nm ラマン分光測定では両者の RBM 領域に顕著な差は生じなかった。要約する と、325 nm レーザー成長後の 514.5 nm のラマン測定においてのみ顕著な共鳴ラマンピーク が確認された。これはレーザーCVD 法でカーボンナノチューブを成長中に、325 nm レーザ ーと共鳴する SWNT の成長が促進され、これが 514.5 nm のラマン測定で共鳴したと考えら れる。また 514.5 nm レーザー成長においても、514.5 nm レーザーに共鳴して SWNT が成長 しているが、ラマン測定では共鳴しなかったと考えられる。

これらの結果は、325 nm 波長のレーザーに共鳴した特定のカイラリティーを選択的に成 長できたと考えられる。 Diameter (nm)



3-3節 電界印加制御成長

[3-3-1] 方向制御

カーボンナノチューブ(CNT)をデバイス応用するために、その位置および方向制御が必要不可欠である。本研究では触媒を微小形状にし、かつ4µm離れた2つの触媒間に電圧を印加しながら CNT を CVD 成長する手法を開発し、CNT の成長位置および方向制御に成功した。図45 は、CNT の成長中に2つの触媒間に電圧を印加した場合としない場合の CNT の成長方向を示したものである。電界を印加しない場合はよこ方向(76~90 度)に成長するが、電界を印加した場合、ほとんどの CNT が電界の方向(0~15 度)に沿って成長することが分かった。これにより CNT の成長位置、方向の制御が電界印加によりある程度可能になった。



図 45、電界印加によるカーボンナノチューブの方向制御

ところが20V前後の高い電圧を印加するとCNTは方向を制御されて陽極より成長する が、陰極手前で成長がとまり、陰極に達しないという問題が生じた。これは陰極に誘引さ れた水素イオンがCNTの成長を阻害するものと考え、20Vから0Vに直線的に減少するラ ンプバイアスを用いることを提案し、これにより架橋の阻害を解決し、90%という高い 架橋率を達成した。

図46 (a)は2つの電極間に一定電圧20Vを印加してカーボンナノチューブを成長した場合 のSEM像である。カーボンナノチューブは陰極側から成長し、陽極側に電界の方向に沿って 成長する。これにより成長方向を電界で制御できることがわかる。しかしながら陽極直前 で成長が止まり、陽極に達するカーボンナノチューブの割合は23%に過ぎない。これは 図46(b)に示すようにカーボンの供給源であるアルコールが分解した際に生じる正の水素 イオンが陰極に引き寄せられ、カーボンをエッチングするためにカーボンナノチューブの 成長が抑制されていると考えられる。そこで図46(c)に示すように20Vから20分間で0V になるような傾斜電圧を印加することを提案した。すなわち高い20Vの電位でカーボンナ ノチューブの方向を制御し、陰極に成長端が近づいた際は低い電圧で水素のエッチング効 果を抑制するという手法である。図46(c)のグラフに示すように一定電印加で成長を行うと 架橋率は23%であるが、傾斜電圧を印加すると78%に急激に増加する。さらにカーボ ンナノチューブを中空に浮かせてファンデルワールス力の影響を除去すると90%の架橋 率を達成することができた。ランプバイアスにより、カーボンナノチューブの方向制御と 高架橋率を達成することに成功した。



図46 (a)一定電圧を印加して成長したカーボンナノチューブのSEM像。左図

(b) 水素イオンによるカーボンのエッチング効果の模式図。中図

(c) 傾斜電圧による架橋率増加の割合。右図

[3-3-2] 本数制御

カーボンナノチューブをチャネルとして用いる電子デバイスにおいて、電極間の本数制御は必要不可欠な技術であるが、従来この制御は不可能であった。本研究開発においてカーボンナノチューブを電極間に成長する際、図47に示すように電極間の電流をモニターした。その結果、モニター電流は図48(a)に示すように、時間の経過と共にディジタル的に階段状に変化する様子が観察された。図48(a)の場合、2つの階段が観察されている。カーボンナノチューブ成長後、電極間に架橋成長したカーボンナノチューブの本数を電子顕微鏡と図48(b)に示すようにElectrical Breakdown 法で確認した。すると電子顕微鏡で観察した架橋成長した CNT の本数と、成長中の電流モニターの階段の数、及び Electrical Breakdown 法の電流の階段の数が一致することが分かった。すなわち、電極間にカーボンナノチューブが架橋するたびに、モニター電流が階段状に増加することを示している。この事実を用いると、モニター電流が一つ目の階段で1本の、2つ目の階段で2本のカーボンナノチューブが電極間に架橋していることを意味している。これにより、電流をモニターして成長することにより、一本一本正確に本数を制御して電極間にカーボンナノチ

ューブを成長できることを初めて示すことに成功した。



図 47、電流モニターで本数制御する手法と電極間を渡る CNT の模式図。



図 48(a)、CNT 成長中における電流をモニターしたもの。2 つの階段電流が観察された。 図 48(b)、Electrical Breakdown 法で CNT を切断した場合の電流。 2 つの階段が観測され、切断した CNT は 2 本であることが分かる。

[3-3-3] エネルギーギャップ導出

従来カーボンナノチューブのバンドギャップを同定するには、フォトルミネッセンスから求めること が行われてきた。しかし最近この方法では、エキシトンの効果などにより正確にバンドギャップを求 めているのかどうかに対して疑問が呈される状況にある。

本研究において、半導体の直接遷移を利用してバンドギャップが求まることを初めて実証した。 電極間に架橋した一本のカーボンナノチューブの電流特性を、室温から900 の高温まで測定し、 価電子帯から伝導帯への電子の直接遷移による電流を測定した。この高温における電流の測定 法を図 49 に示す。電気炉の内部でカーボンナノチューブのソース・ドレイン電極に通電し、 温度を上昇させながら電流を測定するものである。この電流は図 50 に示すように、温度の逆 数に直線的に比例する。この温度に対する電流の傾きは、図 50 の式に示すようにカーボンナノ チューブのエネルギーギャップに比例している。従って、この式と電流の温度の逆数に対 する傾きから、バンドギャップを求めることが可能となる。図 50 のカーボンナノチューブの場合は、 エネルギーギャップは 0.57eV と求まる。この手法は、通常の半導体では当たり前の手法であるが、 カーボンナノチューブに適用したのは初めてである。

図 51 に示すように、当該カーボンナノチューブの直径を原子間力顕微鏡で測定した。カーボ ンナノチューブの直径からも図 52 に示される式を用いて理論的にバンドギャップを算出できる。 この直径から算出したバンドギャップは 0.563eV となり、熱励起電流から求めたバンドギャップの値 と一致した。この結果は、カーボンナノチューブの熱励起電流から正確にバンドギャップが求めら れることを示している。また4つのカーボンナノチューブのエネルギーギャップを熱励起電流から求 め、それぞれの直径を原子間力顕微鏡で測定した結果を図 52 に十字で示す。さらに図 52 に示す エネルギーギャップと直径の関係式から算出した値を実線で示す。十字の実験結果は、実線の計 算結果とよく一致をしていることが分かる。以上のことから、熱励起電流よりカーボンナノチューブの エネルギーギャップが正確に測定できることを初めて実証した。





図 49、温度を RT ~ 900 まで変化させて、カーボンナノチューブの直接遷移による電流を 測定する手法。 Temperature ()



図 50、カーボンナノチューブ電流の温度依存性と求めたエネルギーギャップ



図 51、原子間力顕微鏡により測定したカーボンナノチューブ像と高さ情報。 図 52、カーボンナノチューブの熱励起電流より求めたエネルギーギャップと、原子間力顕 微鏡よりもとめた直径の関係を十字で示す。実線は表式より算出したエネルギーギャップ と直径の関係。

第4章 カーボンナノチューブ バイオセンサー

4-1 節 カーボンナノチューブ FET によるバイオセンサー

[4-1-1] バックゲート構造 CNTFET による超高感度 DNA センサー

カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ(CNT FET)を用いて、DNAのハイブリダイ ゼーション反応を電気的に高感度に検知することに成功した。本研究はカーボンナノチュ ーブFETの研究の初期段階であったので、簡単の為にCNT FETのバックゲートを用いて測定 を行った。測定の原理を図53 (a)に示す。CNT FETのバックゲートにプローブPNAを固定化 する。PNAは、DNAの電荷を有する燐酸の代わりにペプチド骨格からなり、電荷のない人工 的なDNAと考えてよい。PNAは所望のAGTC配列を任意に作成でき、相補的なDNAとハイブリダ イゼーション反応をすることができる。バックゲートにPNAを固定化したCNT FETのバック ゲートを燐酸溶液中におく。溶液中に相補的なDNAがあると、バックゲートに固定化したPNA とハイブリダイゼーション反応を生じ、2重螺旋構造をとる。DNAは燐酸骨格にマイナスの 電荷を有している為に、DNAが2重螺旋構造をとるとCNT FETのバックゲート近傍に負電荷が 凝集することになる。この負電荷が p型CNT FETのチャンルに正孔を誘起し、ドレイン電流 の増加を招く。したがってドレイン電流をモニターすれば、DNAのハイブリダイゼーション 反応を検知することが可能になる。



図53(a)、カーボンナノチューブFETと用いてDNAのハイブリダイゼーション反応を検 知する手法。

図53 (b)、DNAのハイブリダイゼーション反応によるドレイン電流の変化。

図53 (c)、DNAのハイブリダイゼーション反応によるドレイン電流変化の時間依存性。

図53 (b)は、DNAを燐酸溶液中に注入後、1分~180分経過後のカーボンナノチューブFET におけるドレイン電流のドレイン電圧依存性である。ドレイン電流が時間の経過とともに 徐々に増加していることがわかる。図53 (c)はドレイン電流の時間依存性である。30~40分 までは急峻に電流は上昇しその後飽和特性を示す。このドレイン電流の増加はターゲット DNAとプローブPNAがハイブリダイゼーション反応をしたことによるものである。このとき 注入したDNAの濃度は6.8fmol/Iという低濃度であり、これは電気的にDNAのハイブリダイゼ ーション反応を検知した最高の感度である。非相補的なDNAを注入した場合、このようなド レイン電流の増加は見られない。またSNPsを注入した場合は、わずかながらドレイン電流 の増加が観察された。

以上のように、カーボンナノチューブFETを用いて、DNAの電気的検知に成功し、その最高の感度は6.8fmol/Iであり、これは電気的にDNAのハイブリダイゼーション反応を検知した 最高の感度である。 [4-1-2] CNT へのアプタマー直接修飾によるアレルゲンセンサー

カーボンナノチューブの表面に物質が化学吸着する事により、カーボンナノチューブの 電導特性が大幅に変化する事を利用してセンサーに応用できる。したがってセンサーの構 造はカーボンナノチューブの両端に電極をつけ、電流 電圧特性を測定し、そのコンダクタ ンス変化を検出するものである。カーボンナノチューブは単層の半導体的特性を示すもの が用いられる。金属的特性を示すものは、物質の化学吸着によっても、電導特性が変化し ないため利用できない。このカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの構造を用いた バイオセンサーは、カーボンナノチューブを露出したものと、絶縁膜で保護してトップゲ ートを用いるものとの2つの方法がある。

図 54 は、カーボンナノチューブをチャネルとした電界効果トランジスタである。図 54(a) はバイオセンサー全体の顕微鏡写真、図 54(b)はその中のソース / ドレイン電極近傍の顕微 鏡写真、そして図 54(c)は一つのソース / ドレイン電極間に架橋しているカーボンナノチュ ーブの電子顕微鏡写真である。これらは、シリコンを基板とした酸化シリコン上に形成さ れている。シリコン基板の裏側にはバックゲート電極が形成されている。この露出したカ ーボンナノチューブを用いて、免疫グロブリン(IgE)を検知するバイオセンサーとする場合 を考える。



図 54、カーボンナノチューブをチャネルとした電界効果トランジスタ型バイオセンサ。 (a)バイオセンサー全体の顕微鏡写真。(b)その中のソース / ドレイン電極近傍の顕微鏡写 真。(c)一つのソース / ドレイン電極間に架橋しているカーボンナノチューブの電子顕微 鏡写真。

図 55 (a)に示すように、IgE 抗体を、リンカーを用いて直接カーボンナノチューブに修飾し、燐酸緩衝液中に抗原を導入し、IgE の抗原/抗体反応をカーボンナノチューブの伝導 変化で検出しようとする場合を考える。抗原が抗体と反応して、抗原の有する電荷が抗体 のトップ近傍に固定されるとする。この電荷がカーボンナノチューブチャネルの電流に影響を与えるためには、抗体の長さがデバイ長以下である必要がある。ところが IgE 抗体は 長さが数 10nm と巨大であり、燐酸緩衝液のデバイ長~3nm よりはるかに大きい。したがって 抗原/抗体反応が生じても、抗原の電荷の影響は燐酸緩衝液の電気2重層で遮蔽されてし まい、カーボンナノチューブの伝導特性を変調することはできない。したがって抗原/抗 体反応を検出することは不可能である。

この問題を解決するために、IgE 抗体の代わりに IgE 抗体に反応するアプタマーを修飾す る手法を図 55(b)に示す。アプタマーとはシングルストランドの DNA であり、負の電荷を有 している。また IgE 抗体と選択的に反応する。このアプタマーはサイズが 1~2nm と微小で あり、燐酸緩衝液のデバイ長よりも小さい。したがって IgE / アプタマー反応が生じた場合、 電気 2 重層に遮蔽されることなく、カーボンナノチューブの伝導特性を変調し、検出が可 能になる。

図 56 はこの IgE バイオセンサーが選択的に IgE を検出できるかをしらべたものである。 IgE バイオセンサーを燐酸緩衝液中に設置し、燐酸緩衝液(PBS)を 10mM と牛血清アルブミン (BSA)を 20nM をそれぞれ滴下した場合のドレイン電流の変化を調べたものである。ドレイ ン電圧 100mV、ゲート電圧 0V を印加している。両者の滴下によってもドレイン電流は全く 変化しないことがわかる。



図55、カーボンナノチューブに直接たんぱく質を修飾するバイオセンサー。 (a) 抗体をカーボンナノチューブに修飾した場合。 (b) アプタマーをカーボンナノチューブに修飾した場合。

ついで燐酸緩衝液中に IgE 抗体を順次.25nM, 2.2nm, 18.5nm, 159nm と滴下した場合を図 57 に示す。IgE 抗体の滴下によりカーボンナノチュープ電界効果トランジスタのドレイン 電流が減少していることが分かる。IgE 抗体の濃度が一桁近く増加するたびに減少するドレ イン電流の変化量も大きくなっていることが分かる。159nm 滴下した場合は,、殆どドレイ ン電流の変化量が飽和していることが分かる。このドレイン電流の変化は以下の理由で生 じると考えられる。IgE 抗体は正と負の両方の電荷を有している。また IgE アプタマーはシ ングルストランドの DNA であるから、多くの負電荷を有している。この IgE 抗体と IgE ア プタマーが選択的に反応して合体すると、IgE 抗体の正電荷が、IgE アプタマーの負電荷を 打ち消すように働く。従ってカーボンナノチューブ内を流れる正電荷(p型電界効果トラ ンジスタである)は、近傍の負電荷の消滅のために減少し、これによりドレイン電流が減 少すると考えられる。この電流の減少分と濃度の関係をラングミュアの式を用いて解析し、アプタ マー/免疫グロプリン反応の結合エネルギーを算出し、ΔE=-0.51eV/mol と求められた。この値は 他の手法から求められた値と一致しており、本手法を用いて、定量的バイオ検知が可能であること を実証できた。





図 57、カーボンナノチューブにアプタマーを修飾したバイオセンサーを燐酸緩衝液中に設置し、IgE 抗体を 25nM, 2.2nm, 18.5nm, 159nm 滴下した場合のドレイン電流の変化を観察したもの。

[4-1-3] トップゲート構造 CNT FET によるタンパク質センサー

図58 はトップゲート構造カーボンナノチューブ FET を用いたバイオセンサーの例を示す。 カー ボンナノチューブをチャネルトし、その上に絶縁薄膜である窒化シリコンを熱 CVD で形成し、トップ ゲートを形成している。この窒化シリコン薄膜を溶液中で用いるとリーク電流が生じるため、これを 防ぐ目的で全体をレジストでカバーしている。作製した構造の顕微鏡写真を図 58 の右下に示す。 トップゲートの一部のレジストは剥離され、ここに抗体を物理吸着させる。抗体として豚血清アルブ ミン抗体(a-PSA)を用いた。測定方法は図 58 左下に示す。リン酸緩衝溶液中で豚血清アルブミン 抗原(PSA)を添加すると、抗原がトップゲート上の抗体と反応する。抗原は負電荷を有しているため、 この抗原の負電荷により、カーボンナノチューブを流れるドレイン電流が影響を受けて減少する。 従って抗原 / 抗体反応が生じたことを、カーボンナノチューブ電界効果トランジスタのドレイン電流 の変化を測定することにより検知することができる。トップゲート構造カーボンナノチューブ電界効 果トランジスタはn型である。

図 59 の丸印は豚血清アルブミン抗体(a-PSA)の濃度を5桁変化させた場合の、ドレイン電流の 変化分を示したものである。濃度が低い領域では、抗体濃度の増加に従って、ドレイン電流の変化 はリニアに増加するが、濃度が高い領域では、抗体濃度の増加に対して、ドレイン電流の増加は 緩慢になり、最後は飽和にいたることがわかる。

この関係を、図 59 に示すラングミュア等式を用いてフィッティングしたものが実線である。実験結果の丸印と実線とがよい一致をみている。このフィッティングに用いたフィティングパラメータより、豚 血清アルブミンの抗原 / 抗体反応の結合エネルギームEadを求めることができ、ムEad =-0.41eV と求 まった。この値は表面プラズモン法等で求めた値とほぼ一致しており、本測定が正しく抗原 / 抗体 反応を測定していることの証左になる。さらに、このような電気的な測定で抗原 / 抗体反応の結合 エネルギーを求めることができたのは初めてのことであるといえる。

また抗原 / 抗体として豚血清アルブミンと牛血清アルブミンとを用いて同様の実験を行い、相互の抗原 / 抗体反応は生じることがなく、選択的に抗原・抗体反応を電気的に検知できることも実証できた。



図 58、トップゲート構造カーボンナノチューブ電界効果トランジスタをもちいたバイオセンサーの構造と顕微鏡写真、及び測定方法。トップゲートに豚血清アルブミン抗体を修飾し、燐酸緩衝液中で抗原・抗体反応を生じさせる。この反応によるドレイン電流の変化を 測定して、抗原 / 抗体反応を定量的に検知する。

以上により、カーボンナノチューブ電界効果トランジスタを用いて蛋白質の電気的検知が可能で あることが実証できた。電気的測定から抗原 / 抗体反応の結合エネルギーを求めたのはこれが初 めてである。 従って本測定手法は定量的評価も可能であることを実証した。



図 59、豚血清アルブミン抗体(a-PSA)の濃度を 5 桁変化させた場合の、ドレイン電流の変化 分の関係。

4-2節 カーボンナノチューブ電極によるバイオセンサー

[4-2-1] 新しいセンサーの提案

カーボンナノチューブの表面積が巨大であることを利用して電気化学反応の電極として用い、 高感度なバイオセンサーを形成することに成功した。アミノ酸、蛋白質の選択的な検出、酵素の検 出を可能にした。

通常の電気化学反応では白金を電極として用いる。この白金電極上に図 60(a)に示すようにカ ーボンナノチューブを成長すると、表面積が数桁大きくなる。本素子上に図図 60(b)に示すように PDMS を用いて溶液溜を作りつけ、この中にアミノ酸や蛋白質を含んだリン酸緩衝液を満たす。参 照電極と対極を挿入し、対極・カーボンナノチューブ作用極間に電圧を印加してアミノ酸や蛋白質 を酸化させる。その際、酸化電流をモニタすることにより蛋白質等を検出することができる。物質に より酸化電圧が異なるために溶液中の物質の同定が可能になる。

図 61 に予備実験として、フェリシアン化カリウム (K₃[Fe(CN)₆])を、カーボンナノチューブ電極 と通常の白金電極で酸化 / 還元を行った電気化学反応の電極面積依存性を示す。良好な酸化 / 還元特性のピークが観察されている。また当然のことながら電極面積が大きくなるに従って、酸 化 / 還元電流のピーク値は大きくなっている。重要なことはカーボンナノチューブ電極と白金電極 を比較した場合、同じ電極面積でありながら、カーボンナノチューブ電極を用いた場合のほうが、 電流が一桁以上大きいことである。これはカーボンナノチューブ電極の表面積が、白金電極より大 きいことに由来する。この結果は、カーボンナノチューブ電極が従来の白金電極より感度の高いバ イオセンサーとして働くことを示唆している。



図 60、(a)カーボンナノチューブを電極として用いたバイオセンサの構造と電極の電 子顕微鏡写真、 (b)測定法。



図61、(a)カーボンナノチューブ電極と(b)白金電極を用いた場合の、フェリシアン化カリ ウムの酸化電流の電極面積依存性
[4-2-2] アミノ酸の検出

カーボンナノチューブをバルク的な電極として用い、電気化学反応を利用してアミノ酸の一種で あるチロシンの検出を行った。 通常の電気化学反応では白金を電極として用いる。本研究ではこ の白金電極上にカーボンナノチューブを多数成長し、表面積を数桁大きくした。 本素子上に PDMS を用いて溶液溜を作りつけ、この中にアミノ酸を含んだリン酸緩衝液を満たす。参照電極と 対極を挿入し、対極・カーボンナノチューブ作用極間に電圧を印加し、アミノ酸の一種であるチロ シンの酸化電流を検出した。

通常の白金電極を用いてチロシンの酸化電流を測定しても、図 62 (a)の黒線に示すように殆ど検 出限界以下の微小な電流しか測定できない。ところがカーボンナノチューブ電極を用いると図 62 (a)の赤線で示すように顕著な酸化電流のピークが得られ、チロシンの検出に成功した。通常の白 金電極に比べると電流値は2桁近く大きく、カーボンナノチューブ電極を用いると感度が2桁以上 向上することが実証できた。図 62 (b)にチロシン検出前後のカーボンナノチューブの表面の電子顕 微鏡写真を示す。チロシン検出後は、検出前に比較して表面にチロシンが付着していることが明ら かであり、カーボンナノチューブが電極として働いていることを証明できた。



図 62、(a)カーボンナノチューブ電極をと白金電極を用いてアミノ酸の一種であるチロシンの酸化電流を検出した結果。(b)カーボンナノチューブ電極のチロシン検出前後の電子顕 微鏡写真。

[4-2-3] タンパク質の選択的高感度検出

カーボンナノチューブを表面積の巨大な電極として用いて、アミノ酸の高感度検出を行ったのと 同様の手法を用いて蛋白質の選択的検知が可能であることを実証した。アミノ酸の場合と異なるの は、選択的検出をするためにカーボンナノチューブにリンカーを用いて抗体を修飾したことである。

蛋白質として前立腺特異抗原(PSA)を用いた。カーボンナノチューブ電極に図 63 に示すように リンカーを用いて PSA 抗体を固定化する。この試料を燐酸緩衝液中に設置して PSA を導入し、抗 原 / 抗体反応を生じさる。その結果をボルタノグラムで測定し図 63 の右側に示す。抗体のみの酸 化電流を黒の実線で示す。PSA 抗原 / 抗体反応をした場合の酸化電流を青の実線で示す。両者 を比較すると、PSA 抗原 / 抗体反応が生じた場合の方が、抗原の蛋白質が増えるため、酸化電流 が大きく増加する。これに対して、PSA 以外の抗原である BSA を導入した場合、BSA は PSA の抗 体と反応しない。従ってこの場合の酸化電流は、赤の実線で示すように PSA 抗体のみの場合と同 じになった。この手法を用いて感度を測定したところ、PSA 濃度が 0.5ng/mlまで検知できることを実 証した。この値は実際の仕様を満たすものであり、実用化に耐えることを示した。



図 63、アンペロメトリックバイオセンサーによる蛋白質の選択的検出

さらに本手法の感度を向上させる目的で、カーボンナノチューブ電極の形成法を比較し た。図 64 は異なったカーボンナノチューブの成長法で形成した電極を用いた、フェリシア ン化カリウムの酸化電流の比較である。黒の実線で示した一番低い電流ピークは従来の白 金電極を用いた場合である。熱 CVD で成長したカーボンナノチューブ電極を用いた酸化電 流を青で示す。この場合、白金電極を用いた場合に比較して電流が向上することが分かる。 さらにプラズマ CVD を用いて垂直にカーボンナノチューブを稠密に成長した場合は図 64 の 赤の実線で示すようにさらに数倍高い感度が得られることがわかった。(カーボンナノチュ ーブのプラズマ CVD は名古屋大学水谷研との共同研究)したがって、今後蛋白質の高感度 検知にはカーボンナノチューブのプラズマ CVD 成長が最適であることがわかった。



図64、カーボンナノチューブ電極の形成法の違いによる感度の向上。

[4-2-4] 酵素の検出

[4-2-2] [4-2-3]で示したアミノ酸センサーや蛋白質センサーは、本センサーの構造で、単一のターゲットのセンシングが可能であることを示した。本項目では2項目以上のセンシングが同一チップで可能であることを実証した。さらに[4-2-2] [4-2-3]では、PDMS で液溜を形成し、こ

れに参照電極と対極を外から挿入するという形であり、実用化には困難な形状であった。 この問題を解決するために、本項目では参照電極と対極を同一基板上に作りつけ、かつµ TASを基板上に作りつけことにより、より実用化に近いセンサーの開発に成功した。

図 65 はグルコースセンサー、GPT センサーと、参照電極と対極を同一基板上に作りこん だセンサーの模式図である。グルコースセンサー、GPT センサーは酵素 / 基質反応を利用し て生じる過酸化水素水の酸化電流を検知することにより、グルコース、GPT の検出に成功し た。

さらに測定サンプルの微少化とシステムの簡略化のために必要不可欠なマイクロ TAS システム を、図 66 に示すように組み込み、MEMS で作製した送液ポンプで溶液を自動に流入 / 排出して センシングすることに成功した。

以上の様に、より実用化に近いバイオセンサーの開発に成功した。

生体分子のアレイ化



図 65、グルコースセンサー、GPT センサーおよび、参照電極と対極を同一基板上に作りこ んだセンサー。





図 66、MEMS で作製した送液ポンプとマイクロ TAS システムを組み込んだバイオセンサーの平面 図、断面図および作製したシステムの顕微鏡写真。

第5章 カーボンナノチューブ 光センサー

カーボンナノチューブの電界効果トランジスタを利用した光センサーを開発した。図に 69 示す光センサーでは、入射した光により酸化シリコン / シリコン界面で電子 / 正孔対が 発生し、電子が早い拡散速度でカーボンナノチューブ近傍に拡散し、カーボンナノチュー ブ内に正孔を誘起し、電流を増加させる。この電流の変化を検知することにより、入射し た光を検出することができる。

図 68 に、室温におけるカーボンナノチューブ光センサーの感度の波長依存性を示す。室 温における感度の波長依存性では、感度は平均して 10A/W であり、これは従来のシリコン フォトディテクターの感度である 0.5A/W に比較して 20 倍もの感度を示す。

図 69 に入射光の波長を 600nm に固定した場合の、カーボンナノチューブ光センサーの感度の温度依存性を示す。200K 付近で感度は最高値に達し、その感度は 80A/W を示す。この値はシリコンフォトディテクタの 160 倍の感度である。

以上のように、カーボンナノチューブ FET を用いて高感度な光センサーの開発に成功した







図 68、室温におけるカーボンナノチューブ光センサーの感度の波長依存性。 図 69、波長を 600nm に固定した場合の、カーボンナノチューブ光センサーの感度の 温度依存性。

(2)研究成果の今後期待される効果

成果の今後の展開見込、想定される科学技術や社会への波及効果について記載してく ださい。

本研究開発で成功したCNT FETの安定化動作の作製プロセスは、CNTFETの信頼性向上と、 実用化にとって必要不可欠なものであり、極めて重要な成果である。この成果はCNTFETが 実用化された時点で、必ず使われる技術になることは間違いない。CNTFETは、本研究で開 発したバイオセンサーや光センサーだけでなく、機械的なセンサーとしても使用できるため、 広範囲にわたって今後の社会に貢献できるものと考えられる。

本研究開発で成功したCNTへのイオン注入法は、CNTFETの新しい作製プロセスとして非 常に重要な手法であるが、再現性、安定性の点で、もう少し研究開発の時間が必要であると 考えられる。この安定性、再現性が達成されれば、CNTFETの実用化の上で非常に重要なツ ールになることはシリコンプロセスの例を見てもあきらかである。

量子デバイスの作製においては、単一電子トランジスタの室温動作やコヒーレント伝導、 1次元量子伝導の観察に成功したが、中でも重要なことは単一の電荷の検出に成功したこ とである。この技術をバイオセンシングへ活用することで、より高感度な検知、単一分子 の検知、バイオの単一電荷の検知が可能になると考えられ、従来不可能であった非常に面 白い分野が開拓され、新しい科学分野へ大きな波及効果が期待される。その意味で、本研 究開発において非常に重要な進展があったと言える。

本研究におけるCNT成長技術で、レーザー消去法でカイラリティーを制御できることを初 めて示した。本研究開発の後に様々な手法でカイラリティーを分離する技術が世界中から発 表されてきたが、本研究開発が非常に重要な嚆矢となったことは事実である。ただ、いまだ カイラリティーを制御してCNTを成長する技術が開発されておらず、これがCNTの応用のボ トルネックになっている。今後CNTの応用において、この技術開発がきわめて重要になると いえる。

CNTの特長を最も活用した応用がセンサーであると言える。本研究開発では、バイオセン サーと光センサーの開発に成功した。FET型のバイオセンサーでは従来の手法を越える最高 の感度が得られ、CNTFETセンサーの将来性を窺わせる結果が得られている。このセンサー の実用化には、素子の再現性、集積化が必要であり、この為には、今後CNTのカイラリティ ー制御成長、位置制御成長の技術開発が不可欠である。これらが解決すれば、爆発的に応用 展開は拡がると期待できる。

CNTを電極とする高感度バイオセンサは、構造上、作成上の問題は殆ど解決できているの で、近い将来実用化できると期待される。既に企業との実用化研究も開始しており、今後は 実用化での諸問題を解決する必要がでてくるものと思われる。例えば高価なシリコン基板で はなく、安価なガラス基板上に低温でCNTを成長する技術などはその最たるものであろう。 これもそれほど困難な問題ではなく、ハードルは低いと考えられる。また本バイオセンサを 実用化する上で、µTASを利用する方法も一つであるが、より簡便で安価な手法を開拓する ことも重要であり、この技術開発も順調に進んでいる。従って、本バイオセンサーは、近い 将来実用化されることは間違いなく、社会への波及効果は極めて大きいと言えるであろう。

以上、本研究開発では、実用化へのフェーズはそれぞれによって異なり、すぐにでも実 用化可能な技術と、もう一歩大きなブレークスルーが必要な技術とがある。全体的は、本 研究開発において、CNTを用いて科学や社会に大きく貢献できる技術を様々に開発できたと いえる。

- 3.2 CNT-SET のセンサー応用に関する研究開発(富士通粟野グループ)
 - (1) 研究実施内容及び成果
 - (1-1) 研究方針

微細性に優れた CNT と量産性に優れたフォトリソグラフィー技術を組み合わせ、位置制 御した CNT による室温動作 CNT 単一電子トランジスタ(SET)の量産手法を、本チームリー ダーの松本教授(当時産総研)と我々富士通の共同研究として 2003 年に世界に先駆けて 発表した。この技術は、室温では従来不可能であった大気中や溶液中における単一の電 荷検出への応用可能性があり、本プロジェクトでは、こうした高感度センサーの基盤技術開 発を課題として設定した。富士通グループでは 1)センサー感知部作製のための CNT への 官能基形成など化学修飾技術の研究、2)センサーのトランスドューサとなる CNT チャネル の特性安定化技術として、CNT 形成技術と表面トラップ除去技術の研究を行った。



位置、方向、本数、直径制御、半導体/金属作り分け、 表面安定化、その他



(1-2) CNT の化学修飾技術

バイオセンサー応用を想定し、CNT 側壁あるいは末端への化学修飾プロセスとして、2 種類の方法を検討した。一つは、多層 CNT 側壁に - 相互作用による化学吸着法に よって、官能基芳香族分子であるピレン誘導体を化学修飾する技術を開発した。ピレン誘 導体には、タンパク質と選択反応性がある官能基(スクシンイミジル基)を持たせ、この官能 基を介しタンパク質が選択的に CNT 側壁に固定化されることを検証した(図 3.3.2)。ここで CNT としては、熱フィラメント CVD 法によって基板から位置制御したものを使用した。



図 3.3.2 CNT への - 相互作用による化学吸着(ウエット処理)

第2の方法としては、結合が強く修飾が安定している共有結合によって、官能基をドライ 化学修飾する方法を開発した。具体的には、CNTをVUV光により発生させた活性酸素(1 重項)の酸化反応によって、カルボキシル基を含む含酸素官能基を、CNTには目立った損 傷を与えることなく、相当量(2、3分で3%のカルボキシル基)導入できることを確認した(図 3.3.3,図 3.3.4)。ここでカルボキシル基の確認のため、フェリチンをさらに修飾することで、フ ェリチン内の鉄原子を電子顕微鏡観察した(図 3.3.5)。こうしたドライプロセスによるCNT表 面修飾は、不純物汚染が少なく、半導体集積回路レベルのクリーン度で行え、かつスルー プットが高いというメリットがあり、世界初のオリジナル技術である。



図 3.3.3 VUV 照射法を用いた CNT ドライ化学修飾法



図 3.3.4 ドライプロセス化学修飾の確認(IR, XPS, 電子顕微鏡観察)

さらに本手法を拡張し、カルボキシル基では適用できない物質のために、含窒素官能基のドライ化学修飾を試みた。修飾法は、導入ガスとして TEA(トリエチルアミン)を用いたところ以外は上記の方法と同じである。VUV によってラジカル化した TEA を MWNT に結合もしくは TEA 自体を MWNT に吸着させる狙いで実験を行った。図3.3.6 に示すように処理後のサンプルの XPS 測定から C-N 結合の存在を示唆する結果が得られた。このことにより、カルボキリル基、アミノ基、アルキル基、いずれもこのドライ化学修飾法で導入可能であることが分かった。

さらにガスセンサー応用を想定し、常圧下でガス濃度及び湿度をそれぞれ独立に調整 できる評価装置を作製し(図 3.3.7)、テストとして 2 端子 p 型 CNT チャネルの湿度及びエタ ノールによる電流変動の定量評価を行い、感度を持つことを確認した。





図 3.3.5 TEA 導入 VUV ドライ修飾後の XPS 評価 図 3.3.6 ガスセンサー特性評価装置

(1-3) CNT トランスデューサ(チャネル)の安定化技術

CNT をトランスデューサとして利用するには、位置制御して CVD 成長した CNT の特性 歩留りの向上が必須である。特に CNT チャネルとして、半導体的伝導の確保と表面トラッ プなどの影響を抑えた安定動作を図ることが重要である。ここでは CNT チャネルの作製技 術とトラップ除去技術の検討結果について述べる。

通常、CVD 合成した CNT には、半導体的 CNT と金属的 CNT が混在するため、十分な 電流駆動能力を持たせるために多数本の CNT をチャネルとしたトランジスタでは、ドレイン 電流は、ゲート電圧によって制御できる成分(半導体成分と)、制御不能な成分(金属成 分)との和になる。そこでまずCNTチャネルとしては、半導体的CNTを増やす必要がある。 薄膜の触媒金属を用いた CVD では、CNT の直径は制御できない。 そのため単層 CNT と 多層 CNT が混在する。多層 CNT はバンドギャップが小さいため、それだけでも(半)金属 的成分が増えることになる。そこで富士通で所有していたサイズを揃えたナノ微粒子触媒 を用いる技術を適用した(図 3.3.7)。この方法は、今までに多層や単層、2層 CNT に適用し、 直径制御を報告してきたが、それによって直径制御した単層 CNT についての電気的特性 を評価したのは、本研究が初めてである。 単層 CNT の直径ばらつきが、他の手法に比べ て非常に狭いことはすでに実証されている。実験の結果、以下に示すように、直径の細い CNTを均一に作製することで、半導体的 CNT の比率を高めることができることを示した。実 験では、熱酸化膜付の Si ウェハ上に 2 種類の平均直径を持つ Fe 微粒子(2.1nmと1.8nm) を堆積し、各々ホットフィラメント CVD 法によって単層 CNT を成長した。 その後、基板表面 にソースおよびドレイン電極、基板裏面にゲート電極を形成し、バックゲートトランジスタを 作製した。図3.3.8に示すように、半導体的CNTのみのFETもあれば(左図)、金属的CNT と半導体的 CNT が混在した FET(右図)も見られる。図 3.3.9 は、ドレイン電圧を一定とした とき、ドレイン電流の半導体成分と金属成分について、多数の FET についての評価結果を 示す。左側が平均直径 1.8nm、右側が 2.1nm の微粒子を用いた場合である。横軸は全電 流、縦軸はその内の半導体成分を示している。従って、斜め45の線上にデータ点がくれ ば、その FET の CNT チャネルは全て半導体的ということになる。 図より分かるように、2.1nm 微粒子の場合に比べて、1.8nm 微粒子の方が、全電流に対する半導体的電流の比率が高 いことが分かる。これは主に金属的伝導を示す多層 CNT が減ったためと解釈できる。分布 の統計を詳細に調べたところ、1.8nm 微粒子の場合の半導体対金属の比は、理論予測の 2:1 に近いことが分かった。 プラズマ CVD 成長で、半導体的 CNT の比率が金属的 CNT を大きく上回るという報告があるが、我々の熱 CVD 系の成長では、今回の結果は、むしろ 理論予測に近く、今後さらに検討していく必要があることを示唆している。またドレイン電流 の大電流化を考えた場合、小さい微粒子の方が電流が減少しているが、この原因も究明 する必要がある。

次に、CNT チャネルの安定動作化に関する検討結果について示す。トラップが関係す る現象としては、電流 電圧特性に現れるヒステリシス現象とカレントコラプス現象が挙げら れる。ここでカレントコラプスとは、ドレイン電圧を上下させる毎に、異なるドレイン電流が流 れる現象を言う。ヒステリシス現象の抑制は、松本グループの開発した Cat-CVD 法による 保護膜が効果的であることが分かっているため、我々はカレントコラプス現象の抑制に注力 した。現在までのところ、CNT 表面には、当初2種類以上のトラップが存在し、そのうち1つ は、真空引き後の大気解放により、ドーパントとしての酸素が再付着し、表面を安定化させ ることが分かった(図 3.3.10)。また原子層成長(ALD)HfO2 パッシベーション膜によっても、 コラプスのない n 型チャネルの作製が可能であることなどの知見を得た。これらは、CNT ト ランスデューサの歩留りアップに大いに貢献するものである。



図 3.3.8 代表的な CNT チャネルのドレイン電流-ドレイン電圧特性





図 3.3.10 CNT 表面安定化によるカレントコラプス現象の抑制

(2) 研究成果の今後期待される効果

CNT-SET は、超高感度の電荷検出が可能であり、また SET ほどの超高感度はいらない 用途では、CNT-FET が高感度センサーとしての有力デバイスと考えられる。これら基本性 能の高さは、本 CREST チーム全体の研究として示されている。これを今後、実デバイスに 仕上げるには、素子の安定動作とローコスト化が必要であり、CNT チャネルの歩留り向上 が引き続き重要といえる。当グループの研究成果は、そうした意味で CNT チャネルの実現 に向けての基盤技術と位置づけられる。一方、化学修飾技術に関する成果は、カルボキシ ル基と含窒素官能基の両修飾技術が開発できたことで、ほぼ全ての物質に対応可能とな った。また CNT-FET のセンサー応用として、高周波イメージセンサーが期待されるが、こ れは CNT のバリスティック伝導や高移動度、高群速度といった優れた輸送特性に由来す るもので、テラヘルツ級のカットオフ周波数が期待できることが理由である。しかしながら高 周波特性評価は、寄生成分の影響を拭いきれない状況であり、高周波特性を評価できる ほど大きな電流駆動能力が得られていないことが、この評価を遅らせている原因と考えられ る。この応用においては、この点が今後取り組むべき優先課題である。今回の成果の出口 イメージとなるガスセンサーやバイオセンサー、イメージセンサーは、それぞれ、例えば水 素燃料を用いた新しいエネルギーシステム社会における水素センサー、高度ヘルスケアシ ステム社会における各種蛋白センサー、センサーネットワーク社会におけるセキュリティセ ンサーなど、社会を支えるキーコンポーネントとして期待され、波及効果は非常に大きいと いえる。

一方、研究成果の科学技術としての波及効果も多く含まれている。VUV アシストのドライ プロセスによる化学修飾法は、グラフェン系材料にとっての、非常に速度が遅いがコントロ ールされたエッチング技術でもあり、CNT やグラフェンを初めとするカーボン系ナノデバイ スの重要なプロセス技術として活用される可能性がある。また単層 CNT の導電性制御につ いては、ダメージの少ない熱(フィラメント)CVD 合成と、ダメージが懸念されるプラズマ CVD 合成の間で、現時点では結果に違いがあり、今後明らかにすべき課題であるが、半 導体と金属の CVD 成長時制御が可能になれば、CNT-SET, CNT-FET に適用することで、 ピンチオフ特性が重要となるロジック応用分野において、Si CMOS の限界を超える Beyond CMOS デバイスとしての実現可能性が高まることが期待される。

4 研究参加者

氏名	所属	役 職	研究項目	参加時期
松本和彦	産総研	総括研究員	全体の統括	H14,11~ H20,3
小倉睦郎	産総研	主任研究員	電荷測定応用	H14,11~H20,3
菅谷武芳	産総研	主任研究員	極低温測定	H14,11~H20,3
永宗 靖	産総研	主任研究員	フォトルミ測定	H15,4~H20,3
山本和弘	産総研	主任研究員	イオン注入	H15,9~H20,3
小島厚	産総研	CREST 研究員	バイオセンサの開発	H15,4~H18.3
ヒョンチャン	産総研	CREST 研究員	AFM	H15,4~H17,11
上村崇史	筑波大学	大学院学生	欠陥導入法開発	H14,11~H16,3
倉知孝介	明治大学	大学院学生	単一電子素子作製	H14,11~H16,3
前田雅俊	筑波大学	大学院学生	ナノチューブ成長	H15,4~H20,3
坂本一恵	明治大学	大学院学生	デバイス作成	H16,4~H17,3
長尾哲	三菱化学	研究員	イオン注入	H17,4~H20,3
井福康夫	三菱化学メディエンス	研究員	バイオ素子作製	H19,4~H20,3
村田 克之	オリンパス	研究員	バイオ素子作製	H19,4~H20,3
林豊	産総研	招聘研究員	研究評価	H17,4~H20,3
上村 崇史 李 成奇	産総研 産総研	CREST 研究員 CREST 研究員	スピンデバイス作成 ナノデバイス計測	H19,4~H20,3 H19,4~H20,3

産総研グループ(カーボンナノチューブ量子デバイスと単一電子計測の確立)

阪大グループ(カーボンナノチューブバイオセンサーの確立)

氏名	所属	役 職	研究項目	参加時期
松本和彦	大阪大学	教授	全体の統括	H14,11~H20,3
井上恒一	大阪大学	助教授	ラマン測定	H15,4~H20,3
前橋兼三	大阪大学	助手	光学測定	H15,4~H20,3
大野恭秀	大阪大学	助手	デバイス作成	H15,4~H20,3
上村崇史	大阪大学	大学院学生	スピンデバイス作成	H16,4~H19,3
成実一樹	大阪大学	大学院学生	ラマン評価	H16,4~H18,3
藤原泰幸	大阪大学	大学院学生	単一電子素子作成	H16,4~H18,3
紙西大祐	大阪大学	大学院学生	単一電子素子作成	H16,4~H18,3
尾崎弘和	大阪大学	大学院学生	フォトルミ評価	H16,4~H18,3
奥野潤	大阪大学	大学院学生	バイオセンサー	H17,4~H19,3
浅井芳啓	大阪大学	大学院学生	成長制御	H18,4~H20,3
桂大侍	大阪大学	大学院学生	バイオセンサ作製	H18,4~H20,3
西口浩平	大阪大学	大学院学生	単ーデバイス作製	H18,4~H20,3
辻田雄一	大阪大学	大学院学生	バイオセンサ作製	H19,4~H20,3
永曾悟史	大阪大学	大学院学生	単ーデバイス作製	H19,4~H20,3
岩崎晋	大阪大学	大学院学生	ナノチューブデバイス	H19,4~H20,3
山本 泰己	大阪大学	大学院学生	ナノチューブデバイス	H19,4~H20,3

富士通グループ(CNT-SET のセンサー応用に関する研究開発)

氏名	所属	役 職	研究項目	参加時期
粟野祐二	富士通㈱	統括部長付	CNT-SET のセンサー応用に関する	H15,4~H20,3
	電子デバイス事業本		研究開発	
	部デバイス開発統括			
	部			
中村俊二	"	統括部長付	11	H16.4~H18.4
臼杵達哉	"	研究員	"	H15,4~H16,3
浅野高治	"	"	11	H15,4~H20,3
山口佳孝	"	"	11	H15,4~H20,3
岩井大介	11	統括部長付	11	H18,4~H20,3

5 招聘した研究者等

氏 名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
C.Marrian	国際シンポジウム招	淡路島	2003.7.19~7.22
IBM,Director	待講演	sWestin Hotel	
J.Appenzelar	国際シンポジウム招	淡路島	2003.7.19~7.22
IBM,Reseacher	待講演	Westin Hotel	
畠山力三	JST 領域横断ワー	飯綱高原ホテルアル	2006.10.10-12
東北大学 教授	クショップ	カディア	
本多信一	JST 領域横断ワー	飯綱高原ホテルアル	2006.10.10-12
大阪大学 教授	クショップ	カディア	
岡田晋	JST 領域横断ワー	飯綱高原ホテルアル	2006.10.10-12
筑波大学 教授	クショップ	カディア	
遠藤守信	阪大国際ナノシンポ	大阪大学	2007.9.26
信州大学教授	ジウム	シグマホール	
末永和知	阪大国際ナノシンポ	大阪大学	2007.9.25-26
産業技術総合研究所	ジウム	シグマホール	
畠山力三	阪大国際ナノシンポ	大阪大学	2007.9.25-28
東北大学教授	ジウム	シグマホール	
J.Appenzelar	大阪大学	大阪大学	2007.10.15-18
Purdue Univ. Proffessor	松本研究室	産業科学研究所	
	研究討論会		

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 0 件、国際誌 47 件)

産総研・阪大グループ

(1)Kazuhiko Matsumoto, Seizo Kinoshita, Yoshitaka Gotoh, Kousuke Kurachi, Takahumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazue Sakamoto, Masashi Kuwahara, Nobuhumi Atoda, and Yuji Awano, "Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K Using Position Controlled Grown Carbon Nanotube as Channel" Jpn.J. Appl. Phys. Vol.42, Part 1, No.4B, p.2415-2418 (2003). (2) Kazuhiko Matsumoto "Carbon Nanotube Nanoelectron Devices" Proceedings of CREST & QNN03 Joint International Workshop, pp.13-14, (2003)... (3) Y. Nagamune, T. Kamimura, and K. Matsumoto " High sensitive photo-detectors by the combination of acarbon nanotubes and photo-materials " Proceedings of CREST & QNN03 Joint International Workshop, pp.67-68, (2003). (4) T. Kamimura, .K. Yamamoto, and K. Matsumoto " Improvement of Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor Characteristics by Ultra-low Energy Nitrogen-ion Irradiation " Proceedings of CREST & QNN03 Joint International Workshop, pp.63-65, (2003)... (5) T. Yamaguchi, K. Ono, S. Tarucha, T. Kamimura, and K. Matsumoto " Low-temperature transport properties of carbon nanotubes grown by thermal chemical vapor deposition " Proceedings of CREST & QNN03 Joint International Workshop, pp.57-58, (2003)... (6) Takafumi Kamimura, Kazuhiro Yamamoto, Kazuhiko Matsumoto "Ultra-low Energy Nitrogen-ion Irradiation for Improvement of Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor" Extended Abstracts of the 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials SSDM, (Tokyo) pp. 804-805 (7) Kazuhiko Matsumoto 他共著 "Room-Temperature Single Electron Devices formed by AFM Nano-Oxidation ^rApplied Scanning Probe Methods Process" Springer-Verlag, Heidelberg, Editted by B.Bhushan, H. Fucks, S.Hosaka, p459-467 2004年1月刊行 (8) Takafumi KAMIMURA, Kazuhiro YAMAMOTO and Kazuhiko MATSUMOTO "Effects of Ultra Low Energy Nitrogen Ion Irradiation on Carbon Nanotube Channel Single-Electron Transistor" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 5A, (2004) pp. 2771-2773.

 (9) Takafumi Kamimura, Kazuhiko Matsumoto "Reduction of Hysteresis by Refining Process to Carbon Nanotube Field-Effect Transistors"
 IEICE TRANS. ELECTRON, E87-C, (2004) 1795-1798 (10) Kenzo Maehashi, Yasuhide Ohno, Koichi Inoue, and Kazuhiro Matsumoto
 "Chirality Selection of Single-Walled Carbon Nanotubes by Laser Resonance Chirality Selection Method" Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 858-860.

(11) Kenzo Maehashi, Yasuhide Ohno, Koichi Inoue, and Kazuhiro Matsumoto "Chirality Selection of Single-Walled Carbon Nanotubes by Laser Resonance Chirality Selection Method", Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, VOL10, August 16, (2004).

http://www.vjnano.org

(12) T. Yoshimoto, D. Kamimaru, H. Iwasaki, T. Iwata, and K. Matsumoto: "Field emission characteristics from CNT field emitter arrays grown on silicon emitters",
J. Vac. Sci. Technol. B 22(3), 1338 (2004).

(13) M. Maeda, T. Kamimura, C. K. Hyon, A. Kojima, K. Matsumoto "Growth Control of Carbon Nanotube for Electron Device Applications" Extended Abstracts of the 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials SSDM, pp.346 - 347. (Tokyo).

(14) Takafumi Kamimura, Kazuhiko Matsumoto
"Ballistic Transport of Hole in p type Semiconductive Carbon nanotube"
Extended Abstracts of the 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials SSDM, (Tokyo) pp. 344-345

(15) Kenzo Maehashi,Kazuhiro Matsumoto,Kagan Kerman,Yuzuru
Takamura,Eiichi Tamiya "Ultrasensitive Detection of DNA Hybridization Using Carbon Nanotube Field-Effect Transistors" Jpn. J. Appl. Phys. Vol.43 (2004) No.12A pp.L1558
L1560 (Express Letter)

(16) Atsuhiko Kojima, Mitsuyasu Shimizu, Chan Kyeong Hyon, Takafumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto

"Air Stable n-type Top Gate Carbon Nanotube Filed Effect Transistors with Silicon Nitride Insulator Deposited by Thermal Chemical Vapor Deposition " Jpn. J. Appl. Phys. 44 , 11(2005) L328-L330.

(17) Takafumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazue Sakamoto, Kazuhiko Matsumoto
"Room temperature single hole transistors by semiconductor carbon nanotube with artificial defects near carrier depletion" Jpn. J. Appl. Phy. 44, No. 4A (2005) 461-464

(18) Daisuke Kaminishi, Hirokazu Ozaki, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto "Air-stable n-type carbon nanotube field-effect transistors with Si_3N_4 passivation films fabricated by catalytic chemical vapor deposition" Appl. Phys. Lett. 86, 113115 (2005)

(19) Takafumi Kamimura, Kazuhiko Matsumoto
"Electrical Heating Process for p Type to n Type Conversion of Carbon Nanotube Field Effect Transistor" Jpn. J. Appl. Phy., 44, No. 4A (2005) 1603-1605 (20) Atsuhiko Kojima, Chan Kyeong Hyon, Takafumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto, "Protein Sensor Using Carbon Nanotube Field Effect Transistor"
 Jpn. J. Appl. Phys. 44, No. 4A (2005) pp. 1596-1598.

(21) M. Maeda, C. K. Hyon, T. Kamimura, A. Kojima, K. Sakamoto, K. Matsumoto "Growth Control of Carbon Nanotube using Various Applied Electric Fields for Electronic Device Applications" Japanese Journal of Applied Physics Vol. 44, No. 4A, (2005) pp. 1585-1587

(22) Chan Kyeong Hyon, Atsuhiko Kojima, Takafumi Kamimura, Masatoshi Maeda and Kazuhiko Matsumoto, "Non-contact Atomic Force Microscope Electrical Manipulation of Carbon Nanotubes and Its Application to Room Temperature Operating Single Electron Transistor Fabrication", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 4A(2005) pp. 2056-2060.

(23) Kazuhiro YAMAMOTO, Takafumi KAMIMURA and Kazuhiko MATSUMOTO" Nitrogen Doping of Single-Walled Carbon Nanotube by Using Mass-Separated Low-Energy Ion Beams" Jpn. J. Appl. Phy., 44, (2005) 1611-1614.

(24) Yasuhide OHNO, Koichi INOUE, Takafumi KAMIMURA, Kenzo MAEHASHI, Kazuhiro YAMAMOTO and Kazuhiko MATSUMOTO, "Raman Scattering of Single-Walled Carbon Nanotubes Implanted with Ultra-Low-Energy Oxygen Ions" Jpn. J. Appl. Phy., 44, (2005) 1615-1620.

(25) Yasuyuki FUJIWARA, Kenzo MAEHASHI, Yasuhide OHNO, Koichi INOUE and Kazuhiko MATSUMOTO, "Position-Controlled Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes by Laser-Irradiated Chemical Vapor Deposition" Jpn. J. Appl. Phy., 44, (2005) 1581-1584.

(26) Kagan Kerman, Yasutaka Morita, Yuzuru Takamura, Eiichi Tamiya, Kenzo Maehashi, Kazuhiro Matsumoto "Peptide Nucleic Acid-Modified Carbon Nanotube Field Effect Transistor for Ultra-sensitive Real Time Detection of DNA Hybridization" NanoBiotechnology, Vol.1, No.1, (2005) pp. 65 70.

(27) Tomomi Yoshimoto, Tatsuo Iwata, Kazuhiko Matsumoto"Field-Emission Characteristics from Carbon Nanotube Single Tip Grown on Si Cone" Jpn.J. Appl. Phy., 44, 9A (2005) 6739-6741.

(28) Takafumi Kamimura, Kazuhiro Yamamoto, Takushi Kawai, and Kazuhiko Matsumoto, "n-type Doping for Single Walled Carbon Nanotube by Oxygen Ion Implantation with Ultra-low Energy Ion Beam of 25eV" Jpn. J. Appl. Phy., 44, No.11 (2005) pp.8237-8239.

(29) Daisuke Kaminishi, Hirokazu Ozaki, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, Kazuhiko Matsumoto, Yasuhiro Seri, Atsushi Masuda, and Hideki Matsumura, "Air-stable n-type carbon nanotube field-effect transistors with Si3N4 passivation films fabricated by catalytic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 113115. Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology 11 March 28, 2005

(30) Kenzo Maehashi, Yasuhide Ohno, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, "Laser Resonance Chirality Selection in Single-Walled Carbon Nanotubes", AIP Conference Proceedings of 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors 772 (2005) 1023.

(31) Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, Kazuhiko Matsumoto, Akinori Saeki and

Seiichi Tagawa, "Transport Properties of Charge Carriers in Single-Walled Carbon Nanotubes by Flash-Photolysis Time-Resolved Microwave Conductivity Technique", AIP Conference Proceedings of 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors 772 (2005) 1041.

(32) S. Takeda, A. Sbagyo, Y. Sakoda, A. Ishii, M. Sawamura, K. Sueoka, H. Kida, K. Mukasa, K. Matsumoto, Biosens. Bioelectron. 21 (2005) 201-205.

(33) T. Kamimura, K. Matsumoto,

"Coherent transport of hole and Coulomb blockade phenomenon in long p-type semiconductor carbon nanotube", Jpn. J. Appl. Phy., 45, 1A (2006) 338-340.

(34) Y. Ohno, K. Narumi, K. Maehashi, K. Inoue, K. Matsumoto, "Large magnetresistance in single-walled carbon nanotubes contacted different ferromagnetic metal electrode", Journal of Physics, Conference Series 38,(2006) 57-60. NPMS-7/SIMD-5 (Maui 2005)

(35) K. Maehashi, K. Matsumoto,
"High sensitive Label-Free Biosensors Based on Single-Walled Carbon Nanotubes", Proc. Of SPIE Vol. 6127, (2006) 612715-1~612715-4

(36) K. Yamamoto, T. Kamimura, and K. Matsumoto, "Electrical transport characteristic of carbon nanotube after mass-separated ultra-low-energy oxygen ion beams irradiation", Appl. Surf. Sci., 252, 5579-5582, (2006).

(37) K. Maehashi, T. Katsura, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura, & E. Tamiya, "Label-free protein biosensors based on aptamer-modified carbon nanotube field-effect transistors", Anal. Chem., 79, 782-787 (2007).

(38) K. Maehashi, H. Ozaki, Y. Ohno, K. Inoue, K. Matsumoto, S. Seki and S. Tagawa, "Formation of single quantum dot in single-walled carbon nanotube channel using focused-ion-beam technique", Appl. Phys. Lett., 90, 023103/1-3, (2007).

(39) J. Okuno, K. Maehashi, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura, and E. Tamiya, "Single-walled carbon nanotube-arrayed microelectrode chip for electrochemical analysis", Electrochem. Commun., 9, 13-18, (2007).

(40) M. Maeda, T. Kamimura, and K. Matsumoto, "One by one control of the exact number of carbon nanotubes formed by chemical vapor deposition growth: A digital growth process", Appl. Phys. Lett., 90, 043119/1-3, (2007).

(41) J. Okuno, K. Maehashi, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura, and E. Tamiya, "High-sensitive label-free protein biosensors based on single-walled carbon nanotube array modified microelectrodes", Biosens. Bioelectron., 22 (2007) 2377-2381.

(42) Y. Asai, Y. Fujiwara, Y. Ohno, K. Maehashi, K. Inoue, and K. Matsumoto, "Growth of suspended single-walled carbon nanotubes by laser-irradiated chemical vapor deposition", Journal of Physics: Conference Series, : Conference Series 61 (2007) 46-50.

(43) Yasuhide Ohno, Yoshihiro Asai, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue and Kazuhiko Matsumoto, "Coulomb Oscillations at Room-Temperature of Single-Walled Carbon Nanotube Field-Effect Transistors", Technical Proceeding of the 2007 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show 1 (2007) 69-72.

(44) Kenzo Maehashi, Taiji Katsura, Kazuhiko Matsumoto, Kagan Kerman, Yuzuru Takamura and Eiichi Tamiya, "High-sensitive Label-free Biosensors Based on Carbon Nanotube Field-effect Transistors Modified with Aptamers", Technical Proceeding of the 2007 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, 2 (2007) 202-205.

(45) Koichi Inoue, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, and Kazuhiko Matsumoto, "Electronic states of single-walled carbon nanotubes with substitutional impurities", AIP Conf. Proc. 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors 893 (2007) 1031-1032.

(46) Abe, M; Murata, K; Kojima, A; Ifuku, Y; Shimizu, M; Ataka, T; Matsumoto, K "Quantitative detection of protein using a top-gate carbon nanotube field effect transistor" JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C Vol. 111 8667 ~ 8670 (2007)

富士通グループ

(1) Koji Asano, Daiyu Kondo, Akio Kawabata, Fumio Takei, Mizuhisa Nihei and Yuji Awano, "Dry oxidation process of MWNTs with VUV radiation" Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 4B, pp. 3573-3576, 2006

(2)その他の著作物 (総説、書籍など) 著者、タイトル、掲載誌もしくは書籍、 巻、号、ページ、発行年など

産総研・阪大グループ

(1) 松本和彦

「カーボンナノチューブの新展開」

生産研究 Vol.55, No.4, 通卷 633 号(2003) pp.358-365(招待) 東京大学生産技術研究所

(2) 松本和彦

「カーボンナノチューブの異方構造を利用した新規デバイスの設計」 月刊マテリアルインテグレーション誌 2005年2月号 異方性工学のすすめ(3) 異方性インテグレーション

(3) 松本和彦「研究室紹介」 「生産と技術」誌 2006年新春号 Vol.58, No. 1 (2006 / 1 / 25) pp.26 ~ 29

(4) 松本和彦 「カーボンナノチューブ量子効果ナノデバイス」 社団法人高分子学会誌 「高分子」2006年2月号p.94

(5) 松本和彦 「カーボンナノチューブの伝導特性とプローブ応用」 計測自動制御学会誌「計測と制御」Vol.45, No. 2, (2006)特集号 pp.136~139,

富士通グループ

(1) 粟野 祐二、「カーボンナノチューブの電子デバイス応用」、応用物理、Vol.73、No.9

pp.1212-1215、2005

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)招待講演 (国内会議 41 件、国際会議 29 件)

産総研・阪大グループ(松本和彦)

- (1) 期日:2003年1月21日
 場所:キャンパスプラザ京都
 会議:応用物理学会関西支部講演会
 題目:「カーボンナノチューブの電子デバイスへの応用」
- (2) 期日:2003年1月23日 場所:Cornel University 会議: MEXT-NSF Symposium(文部科学省-NSF シンポジウム) 題目: "Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K using Defective Carbon Nanotube as Channel"
- (3) 期日:2003年1月30日場所:San Jose Convention Center会議:SPIE
 - 題目:"Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K"
- (4) 期日:2003年2月28日
 場所:エポカル筑波 国際会議場
 会議:The 1 st Internationa Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary Materials Science" FIMS2003
 題目: "Nano Ecectron Devices by Carbon Nanotube" Plenary Talk
- (5) 期日:2003年4月10日
 場所:東京大学生産技術研究所
 会議:東京大学生産技術研究所 学術講演会
 題目:「カーボンナノチューブの新展開」
- (6) 期日:2003 年 5 月 30 日
 場所:化学会館 (お茶の水)
 会議:CPC 研究会
 題目:「カーボンナノチューブのナノデバイス応用」
- (7) 期日:2003年6月24日
 場所:ユタ大学 米国ユタ州
 会議:Device Research Conference (DRC) ランプセッション
 題目: "Defective Carbon Nanotube Devices"
- (8) 期日:2003年7月2日場所:大阪産業創造会館

会議:ACSIN-7 講習会 題目:「カーボンナノチューブの特性制御の試みとデバイス応用」

- (9) 期日:2003年8月1日
 場所:大阪科学技術センター
 会議:カーボンナノ材料研究会(中山先生主催)
 題目:「カーボンナノチューブの特性制御の試みとデバイス応用」
- (10) 期日:2003 年 8 月 22 日 場所:つくば産総研 つくば中央第 4 会議:フロンティアプロセス 2003 プラズマプロセスパシナの会 題目:「カーボンナノチューブのナノデバイス応用」
- (11) 期日:2003 年 8 月 30 日
 場所:福岡大学 九州
 会議:第 64 回 応用物理学会学術講演会シンポジウム
 題目:「カーボンナノチューブの位置制御成長技術と応用」
- (12) 期日: 2003年9月15日
 - 場所:Salamanca, Spain
 - 会議:TNT03 (Trend in Nano Technology 2003)
 - 題目: "Defective Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K"
- (13) 期日:2003年11月5日
 - 場所:Baltimore Convention Center
 - 会議:50th American Vacuum Soceity Meeting
 - 題目: "Defective Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K and its Applications"
- (14) 期日: 2003年11月10日
 - 場所:宮崎シーガイアマリオットホテル
 - 会議: International Workshop on Multi Processing Technology 2003 (IWMPT 2003)
 - 題目: Carbon Nanotube Single Electron Transistor with Ultra-High sensitivity for Optical and Bio-Sensor

(15) 期日:2003年11月14日

場所:NTT 厚木研究所

- 会議:Functional Semiconductor Nano Structure 2003 (FSNS 2003)
- 題目: Application of Carbon Nanotube Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy
- (16) 期日:2003年11月19日
 - 場所:奈良県新公会堂
 - 会議: ACSIN-7 (7th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interface and Nanostructures)
 - 題目: "Application of Carbon Nanotube Quantum Dot to Single Electron

Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K"

- (17) 期日:2003年11月25日
 場所:明治大学リバティータワー
 会議:計測自動制御学会先端電子計測部会
 講演会テーマ:「カーボンナノ材料を利用した電子デバイスの現状と展望」
 題目:「カーボンナノ材料を利用した電子デバイスの現状と展望」
- (18) 期日:2003年12月19日
 場所:青山学院大学
 会議:電気学会カーボンナノ材料研究会
 題目:「カーボンナノチューブ SET/FET のセンサー応用」
- (19) 期日:2004年2月18日
 場所:日本科学未来館 みらい CAN ホール
 会議:科学技術振興機構 戦略基礎
 ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ全体発表会
 題目:「カーボンナノチューブ単一電子・スピン計測システムの確立」
- (20) 期日:2004年2月27日
 場所:国際高等研究所(奈良)
 会議:「特別研究物質科学とシステムデザイン」分科会合同委員会
- (量子スピントロニクス分科会/有機・分子エレクトロニクス分科会)第5回 題目:「カーボンナノチューブを用いたナノエレクトロニクス応用」
- (21) 期日:2004年3月13日
 場所:大阪府立大学 学術交流会館
 会議:大阪市民講座 表面科学会主催
 題目:「カーボンナノチューブを用いた未来のナノデバイス」
- (22) 期日:2004年4月26日
 場所:海事センタービル 東京麹町 応用物理学会 石原直さん
 会議:応用物理学会「次世代リソグラフィー研究会」
 研究会テーマ「CNTの応用とプロセス技術」
 題目:「CNT 量子効果デバイスと集積化技術」
- (23) 期日:2004年6月9日
 - 場所: 松下電器産業株式会社 高槻 会議:松下電器産業株式会社セミナー 題目:「カーボンナノチューブデバイスとセンサー応用」
- (24) 期日: 2004年7月9日
 - 場所:青山学院大学
 - 会議:応用物理学会薄膜表面物理分科会第 32 回薄膜・表面物理セミナー セミナーテーマ「カーボンナノチュープのエレクトロニクス応用」 題目:「カーボンナノチューブのバリスティック伝導と単一電子伝導

およびその応用」

(25) 期日: 2004 年 7 月 23 日

- 場所:奈良県新公会堂
- 会議: Japan-Switzerland Nanoscience Workshop
- 題目:"Carbon Nanotube Quantum Devices and its Applications with Ultra-High Charge Sensitivity"
- (26) 期日: 2004年8月18日
 - 場所:KKRホテル熱海
 - 会議:JST CREST 第3回福山領域ミーティングプログラム
 - 題目:「カーボンナノチューブ研究の現状」
- (27) 期日:2004年9月1日
 場所:東北学院大学 仙台
 会議:第65回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会
 「カーボンナノチューブのナノデバイスへの応用展開」シンポジウム
 題目:「カーボンナノチューブのバリスティック伝導とセンサー応用」
- (28) 期日:2004年9月9日
 - 場所:北陸先端大学院大学
 - 会議: JAIST International Symposium on Nano Technology 2004
 - 題目: Carbon Nanotube Devices and Bio-Sensor Applications with Ultra-High Charge Sensitivity
- (29) 期日:2004年11月24日
 場所:大阪大学
 会議:東大生研/阪大産研研究所間交流会
 題目:「カーボンナノチューブデバイスとその応用」
- (30) 期日:2004年12月1日
 場所:KAST 神奈川科学技術アカデミー
 会議:KAST教育講座【カーボンナノチューブ-材料開発の新局面】
 題目:トランジスタとセンサー
- (31) 期日:2004年12月2日
 - 場所:筑波国際会議場
 - 会議: The 1st International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON 04) 青野会議 (Celebrating the 15th Anniversary of the Atomcraft Project) 題目: "Carbon Nanotube Applications for Nanoelectronic Devices"
- (32) 期日: 2004 年 12 月 17 日 December 15-17, 2004
 - 場所:神戸国際会議場 International Conference Center Kobe
 - 会議:The 6th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME 2004)
 - 題目: "Carbon Nanotube Quantum Devices and its Application to Bio-Sensor with Ultra-High Sensitivity"
- (33) 期日:2004年12月22日場所:大阪大学会議:東北大通研/阪大産研学術交流会

題目:「カーボンナノチューブ を用いた単電子デバイスと その応用素子」

- (34) 期日: 2005年1月9日
- 場所:名城大学
 - 会議:第28回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 題目: "Carbon Nanotube Devices and its Applications with Ultra-High Charge Sensitivity" 特別講演
- (35) 期日:2005年1月11日 場所:名古屋大学
- 会議:第 288 回物性談話会(豊田理化学研究所後援) 題目:「カーボンナノチューブデバイス研究の現状と将来展望」
- (36) 期日:2005年1月27日
 場所:大阪大学 第2研究棟プロジェクト企画室109号室
 会議:東北大金研/阪大産研学術交流会
 題目:「カーボンナノチューブのバリスティック伝導特性と バイオセンサー応用」
- (37) 期日:2005年3月9日
 場所:奥琵琶湖マキノプリンスホテル
 会議:大阪大学産業科学研究所21世紀 COE 国際シンポジウム
 題目: "Carbonnanotube nanodevices and biosensors"
- (38) 期日:2005年3月12日 前橋兼三、松本和彦場所:KKR 熱海会議:科学技術振興機構 戦略基礎
 ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ全体発表会
 - 題目:「カーボンナノチューブ電界効果トランジスタを用いた DNAの高感度検出」
- (39) 期日:2005年3月16日
 場所:大阪工業大学60周年記念館
 会議:大阪工業大学バイオベンチャーフォーラム
 題目:「カーボンナノチューブデバイスとバイオセンサー応用」
- (40) 期日:2005年3月30日
 場所:埼玉大学
 会議:第52回応用物理学会関係連合講演会 シンポジウム招待講演
 題目:「カーボンナノチューブ電界効果トランジスタの作成と
 バイオセンサーへの応用」
- (41) 期日:2005年10月18日
 場所:大阪府立大学
 会議:大阪府立大学教員向けセミナー
 題目:「カーボンナノチューブデバイスの応用と将来展望」
- (42) 期日:2005年10月25日

場所:名古屋大学

会議:第9回名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリーシンポジウム 題目:「カーボンナノチューブのデバイス応用」

- (43) 期日:2005年11月17日 場所:大宮ソニックシティー 会議:第25回表面科学講演大会 「シンポジウム カーボンナノチューブ STM/AFM 探針の作製と展開」 題目:「カーボンナノチューブの量子伝導とプローブ応用」
- (44) 期日:2005年12月15日 場所:名古屋大学
 - 会議: 名古屋大学電気系 COE 「ナノプロセス、ナノデバイスおよび そのシステム応用に関する国際ワークショップ」 International COE Workshop on Nano Processes and Devices, and Their Applications
 - 題目: "Carbon Nanotube Devices and Applications"
- (45) 期日: 2006 年1月26日 K. Maehashi, K.Matsumoto
 場所:サンノゼ コンベンションセンター
 会議: Photonics West 2006
 題目: "High-Sensitive Label-Free Biosensors Based on Single-Walled Carbon "
- (46) 期日:2006年1月26日
 M.Maeda, T.Kamimura, C.Hyon, K.Murata, K.Matsumoto
 場所:サンノゼ コンベンションセンター
 会議:Photonics West 2006
 題目: "Precise control of carbon nanotube growth by current monitoring"
- (47) 期日:2006年1月26日T.Kamimura, K.Matsumoto
 場所:サンノゼ コンベンションセンター
 会議:Photonics West 2006
 題目:"Electrical observation of 1D sub-band structure of carbon nanotube in Schottky barrier transistor"
- (48) 期日:2006年1月26日C.Hyon, T.Kamimura, M.Maeda, K.Matsumoto,
 場所:サンノゼ コンベンションセンター
 会議: Photonics West 2006
 題目: "Island Size Control of carbon Nanotube Single Electron Transistor
 operating at Room Temperature by AFM Electrical Manipulation "

 (49) 期日:2006年3月27日
 場所:東北大金研
 会議:東北大金研/阪大産研研究交流ワークショップ
 題目:「カーボンナノチューブの量子伝導特性と バイオセンサー応用」

(50) 期日: 2006年4月27日

- 場所:大阪大学産業科学研究所
- 会議:東北大多元研、北大電子研、東工大資源研、阪大産研アライアンス ワークショップ
- 題目:「カーボンナノチューブ デバイスとバイオセンサー応用」
- (51) 期日: 2006年6月23日
 - 場所:長岡科学技術大学
 - 会議: 第3回 Cat-CVD 研究会
 - 題目:「Cat-CVD SiN 膜のカーボンナノチューブ デバイスへの応用」
- (52) 期日:2006 年 8 月 29 日
 場所:立命館大学 草津キャンパス
 会議:第 66 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会
 - 「カーボンナノチューブの最新動向」シンポジウム
 - 題目:「新プロセスによるカーボンナノチューブ FET とバイオセンサー応用」
- (53) 期日:2006年9月5日
 場所:北大触媒化学研究センター
 会議:北大触媒化学研究センター・阪大産研研究所間交流
 題目:「カーボンナノチューブデバイスとセンサー応用」
- (54) 期日:2006年9月8日
 場所:新横浜国際ホテル
 会議:STARCシンポジウム2006
 (半導体理工学研究センター)
 題目:「カーボンナノチューブ デバイスの最近の動向」
- (55) 期日:2006年10月26日 場所:東北大学多元物質研究所 会議:東北大多元研・阪大産研アライアンス研究会 題目:「カーボンナノチューブデバイスの実用化に向けて」
- (56) 期日:2006年10月30日
 場所:ユーリッヒ研究所
 会議:ユーリッヒ研究所・阪大産研国際交流研究会
 題目: "Carbon Nanotube Devices and Applications"
- (57) 期日:2006年11月22日
 場所:大阪大学中之島センター
 会議:第2回阪大ナノサイエンスナノテクノロジー国際シンポジウム
 題目:「カーボンナノチューブとデバイス応用」
 "Application of Carbon Nanotube Devices"
- (58) 期日:2006年12月7日

Advanced Heterostructure Workshop "Carbon Nanotube Devices & Application"

(59) 期日: 2007年1月24日

場所:北海道大学創成科学研究棟5階大会議室 会議:ナノテクノロジー・ナノサイエンス概論 II 題目:「カーボンナノチューブを用いた単電子デバイスとその応用

- (60) 期日:2007年1月25日
 場所:大阪大学産業科学研究所
 会議:阪大/韓国忠南カーボンナノチューブとデバイス応用」
 大学大学間交流ワークショップ
 - 題目:" Carbon Nanotube Quantum Devices and Applications"
- (61) 期日:2007年2月25日
 場所:韓国 東国大学(トングー大学)
 会議:21COEワークショップin Korea
 題目: "Application of Carbon Nanotube Devicesß"
- (62) 期日:2007年3月9日
 場所:名古屋大学豊田講堂シンポジオン
 会議:第10回応用物理学会東海支部基礎セミナー
 「人間の五感センサーに迫る」・基礎と応用から最先端研究まで・
 題目:「カーボンナノチューブを用いたバイオセンサー」
- (63) 期日:2007年3月12日~16日
 場所:Phoenix, Arizona
 会議:3rd Nano & Giga forum in Arizona (NGC2007)
 題目: "Carbon Nanotube Devices and Applications"
- (64) 期日:2007年3月20日~23日
 場所:名城大学 天白キャンパス(名古屋市)
 会議 電子情報通信学会07年総合大会
- シンポジウム: CS-7 有機エレクトロニクス・分子エレクトロニクスの新展開
- 有機エレクトロニクス研究専門委員会
 - 題目:「カーボンナノチューブ電子デバイスとその応用」
- (65) 期日:2007年4月25日
 場所 大阪大学中之島センター
 会議 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai
 IEEE 関西支部主催
 - 題目 "Carbon Nanotube Quantum Devices & Applications"
- (66) 期日:2007年6月6日
 - 場所 神田学士会館
 - 会議 アライアンス発足記念シンポジウム
 - 題目:「カーボンナノチューブ単一電子トランジスタによる単一電荷計測」
- (67) 期日: 2007年11月8日
 - 場所: 京都国際会議場
 - 会議 マイクロプロセスコンファレンス
 - 題目:" Carbon Nanotube Bio Sensor"

富士通グループ

(1)2003年12月20日

粟野祐二(富士通、富士通研、CREST/JST)

「カーボンナノチューブの CVD 成長技術と電子デバイス応用」、フロンティアマテリアル研究 会、東京都

(2)2004年7月2日

Y. Awano, M. Nihei and N. Yokoyama(富士通、富士通研、CREST/JST)

"CVD-Growth Technologies and Electron Device Applications of Carbon Nanotubes" 2004 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2004), Nagasaki, Japan,

(3)2004年7月9日
 粟野祐二(富士通、富士通研、CREST/JST)
 「カーボンナノチューブの電子デバイスへの応用」
 日本材料学会分子動力学部門委員会、大阪、2004年7月9日

口頭発表 (国内会議 60 件、国際会議 101 件)

産総研・阪大グループ

[1]2002年11月5日

Kazuhiko Matsumoto, Takahumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazue Sakamoto, Kousuke Kurachi

"Room Temperature Coulomb Diamond Characteristics in Single Electron Transistor with Position Controlled Grown Carbon Nanotube Channel"

2002 American Vacuum Society Meeting AVS 49th International Symposium (2002) Denver.

[2] 2002年12月3日 Kazuhiko Matsumoto "Defective Carbon Nanotube for Multi-Island Single Electron Transistor with Room Temperature Coulomb Diamond Characteristics" Advanced Hetero Workshop (Hawaii)

[3] 2003 年 1 月 15 日 松本和彦 「カーボンナノチューブのナノデバイスへ応用」 NEDO 養成講座 筑波研究支援センター

[4] 2003年2月10日
 上村崇史、坂本一恵、前田雅俊、倉知孝介、松本和彦
 "位置制御成長カーボンナノチューブへの欠陥誘起による電気特性変化"
 電子情報通信学会・北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター共催研究会(北海道大学 札幌)

[5]2003年3月10日 松本和彦 "Single Eleectron Tranasistor using Carbon Nanotube Channel" The 1 st Internationa Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary CISN 2003 Carrier Interaction and Spintronics in Nanostructures (NTT厚木)

[6] 2003年3月27日

坂本一恵、上村崇史、前田雅俊、松本和彦 「電界印加触媒パターニング法によるカーボンナノチューブの位置・方向制御成長 II 」 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学横浜校舎)

[7] 2003年3月28日 前田雅俊、上村崇史、坂本一恵、松本和彦 「低電圧動作カーボンナノチューブ・フィールドエミッタの作製II」 第50回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学横浜校舎)

[8] 2003 年 3 月 29 日 上村崇史、坂本一恵、前田雅俊、松本和彦 「室温動作カーボンナノチューブ単一電子トランジスタ特性」 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学横浜校舎)

[9] 2003 年 3 月 29 日 山本和弘、上村崇史、松本和彦 「窒素イオンドープしたカーボンナノチューブ(I) -構造解析-」 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学横浜校舎)

[10] 2003 年 3 月 29 日
 山本和弘、上村崇史、松本和彦
 「窒素イオンドープしたカーボンナノチューブ(II) -電気伝導特性-」
 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学横浜校舎)

[11] 2003年6月25日 T. Kamimura, K. Sakamoto, M.Maeda, K.Kurachi, K. Matsumoto "Fabrication and I-V Characterization of Carbon Nanotube Single Electron Transistor Operated at Room Temperature", Device Research Conference (DRC) ユタ大学 米国ユタ州

[12] 2003年6月25日 Takafumi Kamimura, Kazue Sakamoto, Masatoshi Maeda, Kousuke Kurachi, Kazuhiko Matsumoto "The Room Temperature Operation of Carbon Nanotube Single Electron Transistors by Carrier Depletion" The Electronic Materials Conference (EMC), University of Utah,

[13] 2003 年 7 月 17 日

松本和彦 、上村崇史

"Temperature Dependence of Carbon Nanotube Channel Single Elewctron Transistor" The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS 11) 奈良新公会堂 [14]2003年7月21日 Kazuhiko Matsumoto "Carbon Nanotube Nanoelectron Devices" CREST & QNN03 Joint International Workshop 淡路島国際夢舞台

[15] 2003 年 7 月 21 日
Y. Nagamune, T. Kamimura, and K. Matsumoto
" High sensitive photo-detectors by the combination of
acarbon nanotubes and photo-materials "
CREST & QNN03 Joint International Workshop 淡路島国際夢舞台

[16]2003年7月21日 T. Kamimura, .K. Yamamoto, and K. Matsumoto "Improvement of Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor Characteristics by Ultra-low Energy Nitrogen-ion Irradiation " CREST & QNN03 Joint International Workshop 淡路島国際夢舞台

[17]2003年7月21日 T. Yamaguchi, K. Ono, S. Tarucha, T. Kamimura, and K. Matsumoto "Low-temperature transport properties of carbon nanotubes grown by thermal chemical vapor deposition " CREST & QNN03 Joint International Workshop 淡路島国際夢舞台

[18] 2003 年 8 月 31 日 上村崇史、松本和彦 「欠陥導入によるカーボンナノチューブ FET のヒステリシス特性変化」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[19]2003 年 8 月 31 日 前橋兼三、大野恭秀、井上恒一、松本和彦 「単層カーボンナノチューブの酸化の影響」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[20]2003年8月31日 前四雅俗 上村岩中 合知考众 自地直

前田雅俊,上村崇史,倉知孝介,鳥越真志,小島厚彦, Chan kyeong Hyon, 松本和彦 「バックゲート電圧制御によるカーボンナノチューブの方向制御」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[21] 2003 年 8 月 31 日 倉知孝介、鳥越真志、松本和彦、上村崇史、小島厚彦、前田雅俊、Chan kyeong Hyon、 根 本俊雄 「カーボンナノチューブのセンサー応用」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[22] 2003 年 8 月 31 日 小島厚彦、上村崇史、前田雅俊、倉知孝介、鳥越真志、Chan kyeong Hyon、 松本和彦 「カーボンナノチューブ FET 特性に及ぼす水の影響」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[23] 2003 年 9 月 1 日 大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦 「単層カーボンナノチューブのフォトルミネッセンス測定」 第 64 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会 (福岡大学 九州)

[24] 2003年9月17日

Takafumi Kamimura, Kazuhiro Yamamoto, Kazuhiko Matsumoto

"Ultra-low Energy Nitrogen-ion Irradiation for Improvement of Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor"

The 2003 Solid State Devices and Materials (SSDM), Keio Plaza Inter-continental Tokyo

[25]2003年11月10日

Takahumi Kamimura, Kazuhiro Yamamoto, Kazuhiko Matsumoto

"Ultra-low Energy Nitrogen-ion Irradiation for Quantum Dots Size Control in Carbon Nanotube Channel Room Temperature Single Electron Transistor"

Joint Meeting of the 2nd International Symposium on "Future-Oriented Interdisciplinary Materials Science" and the 1st International Tsukuba-Symposium on "Nanoscience" FIMS/ ITSNs 2003, Tsukuba International Congress Center エポカ ル筑波国際会議場

[26] 2003年11月14日 Kousuke Kurachi1, Masashi Torigoe1, Kazuhiko Matsumoto2 "Application of RT Carbon Nanotube Single Electron Transistor to Methanol Sensor "

Functional Semiconductor Nano Structure 2003 (FSNS 2003) NTT 厚木研究所

[27] 2003 年 11 月 29 日 松本和彦 「カーボンナノチューブを用いたナノデバイスと応用」 産研学術講演会 大阪大学産業科学研究所

[28] 2003年12月3日

Kazuhiko Matsumoto, Yasushi Nagamune, Atsushi Kojima

"Optical Sensor and Bio Sensor Applications using Carbon Nanotube Channel Single Electron Transistor

NPMS-6/SIMD-4 2003 学術振興会第151委員会 研究会 (ハワイ)

(Six International Conference on new phenomena in Mesoscopic Structures,

Fourth International Conference on Surface and Interface of Mesoscopic Devices)

[29] 2003 年 12 月 9 日 K. Matsumoto, K. Inoue, K. Maehashi, Y. Ohno "Carbon Nanotube FET/SET with Ultra-High Sensitivity for Sensor Application" SANKEN COE/Nanotechnology Symposium 大阪大学産業科学研究所

[30] 2004 年 2 月 25 日 松本和彦 「カーボンナノチューブの特性制御とナノデバイス応用」 東北大金研 / 大阪大学産研 研究交流ワークショップ 東北大学金属材料研究所 COE 研究棟セミナー室 [31] 2004 年 2 月 26 日 松本和彦 「カーボンナノチューブのバリスティック伝導特性および単一電子特性とその応用」 阪大産研 / 東北大多元研学術交流会 大阪大学産業科学研究所講堂

[32] 2004年3月28日

上村崇史、Chan Kyeong Hyon、小島厚彦、倉知孝介、前田雅俊、河井拓志、鳥越真志、松本和彦

「半導体的カーボンナノチューブにおける伝導キャリアのコヒーレンス長」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[33] 2004年3月28日

河井拓志、鳥越真志、倉知孝介、上村崇史、小島厚彦、前田雅俊、Chan kyeong Hyon 、松 本和彦、根本俊雄

「カーボンナノチューブへの酸素イオン照射による電気伝導特性変化」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[34] 2004年3月29日

倉知孝介,鳥越真志,河井拓志,上村崇史,小島厚彦,前田雅俊,Chan kyeong Hyon,佐藤俊一, 吉冨敦司,竹崎泰一,末岡和久,武笠幸一,根本俊雄,松本和彦 「カーボンナノチューブ室温単電子トランジスタ プローブの試作」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学)

[35] 2004年3月28日

鳥越真志,倉知孝介,河井拓志,上村崇史,小島厚彦,前田雅俊,Chan kyeong Hyon, 根本俊雄,松本和彦

「In situ 水素エッチングによるカーボンナノチューブへの欠陥導入」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[36] 2004 年 3 月 28 日

Chan Kyeong Hyon,上村崇史,小島厚彦,前田雅俊,倉知孝介,鳥越真志,河井拓志,松 本和彦,「NC-AFM による カ-ボンナノチュ-プへの欠陷導入」 第 51 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東京工科大学)

[37] 2004 年 3 月 29 日 小島 厚彦, Chan Kyeong Hyon,上村 崇史,倉知 孝介,前田 雅俊,河井 拓志, 鳥越 真志, 松本 和彦 「カーボンナノチューブ FET のバイオセンサーへの応用」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[38] 2004 年 3 月 29 日 前田雅俊,上村崇史,小島厚彦,玄燦慶,倉知孝介,河合拓志,鳥越真志, 松本和彦「異なる電圧印加による電極間のナノチューブ架橋率の変化」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[39] 2004 年 3 月 29 日 井上恒一、前橋謙三、大野恭秀、松本和彦 「カーボンナノチューブの振動モード計算とラマン散乱による評価」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子) [40] 2004年3月31日

前橋謙三、成実一樹、藤原泰幸、大野恭秀、井上恒一、松本和彦 「Cu・カーボンナノチューブ(CuNT)ダマシン配線用の CuNT 薄膜の作製 」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[41] 2004年3月28日

大野恭秀、前橋謙三、井上恒一、松本和彦、佐伯昭紀、関修平、田川精一

「時間分解マイクロ波誘電吸収法による単層カーボンナノチューブの伝導度測定」 第 51 回応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学 八王子)

[42] 2004年3月

山口智弘、大野圭司、樽茶清悟、上村崇史、松本和彦 「熱 CVD 法により成長したサスペンデッドカーボンナノチューブの低温伝導特性」 日本物理学会春期大会

[43] 2004年6月22日

T. Kamimura, C. K. Hyon, A. Kojima, M. Maeda, and K. Matsumoto "Coherent Transport of Hole in p type Semiconductive Carbon Nanotube"" Device Research Conference DRC Notre Dame University

[44] 2004年6月24日 Takushi Kawai, Takafumi Kamimura, Chan Kyeong Hyon, Atsuhiko Kojima, Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto "Control of Electrical Property of Carbon Nanotube by Oxygen Ion Implantation with Ultra-low Energy of 25eV" The Electronic Materials Conference (EMC), Notre Dame University

[45] 2004年6月24日

Takafumi Kamimura, Chan Kyeong Hyon, Atsuhiko Kojima, Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto "P type Semiconductive Carbon nanotube for Quantum Wire" The Electronic Materials Conference (EMC), Notre Dame University

[46] 2004 年 6 月 23 日 松本和彦

"Carbon Nanotube Quantum Devices and its Applications with Ultra-High Charge Sensitivity" Japan-Switzerland Nanoscience Workshop 奈良県新公会堂

[47]2004年6月24日

M. Maeda, T. Kamimura, C. K. Hyon, A. Kojima, K. Kurachi, T. Kawai, M. Torigoe, K. Matumoto, "Growth Control of Carbon Nanotube by Applied Electric Field" Electronic Material Conference Notre Dame University

[48]2004年7月1日 Kazuhiko Matsumoto "Application of Ultra-High Sensitive Electrometer by Carbon Nanotube Quantum Dot Single Electron Transistor at Room Temperature" NANO 8, ベネティア

[49]2004年7月6日 Kazuhiko Matsumoto, Takafumi Kamimura, Atsuhiko Kojima*1, Yasushi Nagamune "High Sensitivity of Carbon Nanotube Single Electron Transistor Sensor" Asia-Pacific Conference on Transducer and Micro-Nano Technology (APCOT MNT2004) 札幌

[50]2004年7月 K. Maehashi, Y. Ohno, K. Inoue, and K. Matsumoto "Chirality Selection of Single-Walled Carbon Nanotubes by Laser Resonance Chirality Selection Method", 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Flagstaff, Arizona, USA, Jul. 26-30, 2004.

[51] 2004 年 9 月 3 日

藤原泰幸、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦 「レーザーCVD 法による単層カーボンナノチューブの位置選択成長」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[52]2004年9月3日

成実一樹、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦

「レーザーアニールによるカーボンナノチューブ・電極間の接触抵抗改善」

第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[53]2004年9月3日

藤原泰幸、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦 「レーザーCVD 法による単層カーボンナノチューブの位置選択成長」

第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[54]2004年9月3日

尾崎弘和、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦、瀬里泰洋、増田淳、松村英樹「CAT-CVD 法によるカーボンナノチューブ上への Si3N4 保護膜作製」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[55]2004年9月3日

紙西大祐、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦、瀬里泰洋、増田淳、松村英樹 「CAT-CVD-Si3N4 膜によるカーボンナノチューブ FET のヒステリシス改善」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[56]2004年9月3日

前橋兼三、松本和彦、カーン ケルマン、高村禅、民谷栄一、 「カーボンナノチューブ FET を用いた DNA ハイブリダイゼーションの超高感度検出」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[57]2004年9月3日

カーン ケルマン、高村禅、民谷栄一、前橋兼三、松本和彦、

「PNA 修飾したカーボンナノチューブ FET を用いた非標識 DNA の超高感度検出」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[58]2004年9月3日

大野恭秀、上村崇史、前橋兼三、井上恒一、山本和弘、松本和彦、

「酸素イオン注入した単層カーボンナノチューブのラマン散乱測定」

第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[59]2004年9月3日

井上恒一、大野恭秀、前橋兼三、松本和彦、

「置換形酸素不純物を含む単層カーボンナノチューブの電子状態」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[60]2004年9月4日

小島 厚彦, 長尾 哲, 三谷 浩, 井福 康夫,玄燦慶, 上村 崇史, 前田 雅俊,田中 亮大, 松本 和彦、「カーボンナノチューブ FET を用いたバイオセンシング」 第65回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[61]2004年9月3日 小島 厚彦,玄燦慶,上村 崇史,前田 雅俊,田中 亮大,松本 和彦、 「カーボンナノチューブ FET 特性の保護膜による安定化」 第65回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[62]2004年9月3日 玄燦慶,上村 崇史,小島 厚彦,前田 雅俊,松本 和彦、 「NC-AFM による 室溫 動作 カ-ボン ナノチュ-ブ SET」 第65回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[63]2004年9月3日

上村 崇史, 玄燦慶,小島 厚彦,前田 雅俊,田中 亮大, 松本 和彦、 「高接触抵抗がカ-ボン ナノチュ-ブ量子効果でバイスへ与える影響」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[64]2004年9月3日

田中 亮大,前田 雅俊,上村 崇史, 玄燦慶,小島 厚彦,松本 和彦、 「室温動作カーボンナノチューブ単一電子トランジスタプローブの作製」 第 65 回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[65]2004年9月3日

前田 雅俊,上村 崇史, 玄燦慶,小島 厚彦, 田中 亮大,松本 和彦、 「ナノチューブ高架橋率の為の最適傾斜電圧印加条件」 第65回応用物理学学術講演会応用物理学関係連合講演会(東北学院大学 仙台)

[66] 2004年9月12日~17日 T. Yoshimoto1, T. Iwata1, K. Matsumoto "Field-Emission Characteristics from Carbon Nanotube Single Emitter Grown on Si Cone" 15th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide Sept. 12 17, Riva Del Garda, Italy

[67] 2004年9月16日 Takafumi Kamimura, Kazuhiko Matsumoto

"Ballistic Transport of Hole in p type Semiconductive Carbon nanotube r" The 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Tower Hall Funabori

[68]2004年9月16日 M. Maeda, T. Kamimura, C. K. Hyon, A. Kojima, K. Matsumoto, "Growth Control of Carbon Nanotube for Electron Device Applications" The 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Tower Hall Funabori [69] 2004年11月15日 K. Matsumoto

"Ballistic Transport of Hole in 4µmm Carbon Nanotube Channel Transistor with Coulomb Blockade Effect", 51th American Vacuum Society Meeting, Anaheim USA

[70] 2004年12月10日 K. Matsumoto "Carbon Nanotube Devices and Applications", Advanced Hetero Workshop, Hawaii

[71] 2005 年 3 月 29 日 上村崇史、Chan Kyeong Hyon、小島厚彦、前田雅俊、坂本一恵、田 中亮大、金田琢磨、松本和彦 「Pt、Ag、AI、Ti 電極を用いた CNT-FET における吸着分子脱 離前後の I-V 特性変化」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大学 埼玉)

[72] 2005年3月29日

坂本一恵,山本和弘、上村崇史、玄燦慶、小島厚彦、前田雅俊,金田拓磨,田中亮大,松本 和彦、根本俊雄 「カーボンナノチューブへの酸素イオン照射による電気伝導特性変化」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大学埼玉)

[73] 2005 年 3 月 29 日

小島厚彦, 玄燦慶, 上村崇史, 前田雅俊, 坂本一恵, 金田拓磨, 田中亮大, 松本和彦「熱 CVD 法により成膜した窒化シリコン絶縁膜を有するカーボンナノチュープトップゲート FET」第52回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[74] 2005 年 3 月 29 日

小島厚彦, 玄燦慶, 上村崇史, 前田雅俊, 坂本一恵, 金田拓磨, 田中亮大, 松本和彦「カ ーボンナノチューブトップゲート n 型 FET のバイオセンサーへの応用」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[75] 2005 年 3 月 29 日 紙西大祐、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦、瀬里泰洋、 増田淳、松村英樹、仁木敏一 「Cat-CVD 法で作製した SiNx 絶縁膜上にトップゲート構造 を有するカーボンナノチューブ FET」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[76] 2005 年 3 月 30 日 玄燦慶、上村崇史、小島厚彦、前田雅俊、松本和彦 「NC-AFNによる室温動作カーボンナノチューブSETのサイズ依存性」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[77] 2005 年 3 月 30 日

尾崎弘和、前橋兼三、大野恭秀、井上恒一、松本和彦、岡本一将、関修平、古澤孝弘、田 川精一「電子線を用いたカーボンナノチューブナノデバイスの作製」 第52回応用物理学 会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[78] 2005 年 3 月 30 日 田中亮大、前田雅俊、上村崇史、玄燦慶、小島厚彦、金田拓磨、坂本一恵、関 修平、稲田正樹、清水三聡、安藤淳、松本和彦、根本俊雄「室温動作 CNT トプゲート構造 SET プローブの試作」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[79] 2005 年 3 月 31 日

藤原泰幸、大野恭秀、前橋兼三、井上恒一、松本和彦 「レーザ照射 CVD 法を用いた単層 カーボンナノチューブ成長のレーザ強度・照射時間依存性」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[80] 2005 年 3 月 31 日 奥野潤、前橋兼三、大野恭秀、井上恒一、松本和彦 「カーボンナノチューブ FET に向け た Co 触媒を用いた CNT 成長」 第 52 回応用物理学会関係連合講演会(埼玉大 埼玉)

[81] 2005 年 3 月 31 日 前田雅俊、上村崇史、玄燦慶、小島厚彦、坂本一恵、田中亮大、山本和弘、金田拓磨、松 本和彦 「電界印加成長によるカーボンナノチューブの電気特性への影響」 第 52 回応用 物理学会関係連合講演会(埼玉大学埼玉)

[82] 2005年6月22日

T. Kamimura, M. Maeda, Y. Nagamune, T. Nakanishi, and K. Matsumoto,

"Electrical Observation of One Dimensional Sub-band Structure of Carbon Nanotube in Schottky Barrier Transistor", Device Research Conference (DRC) Late News University of California, Santa Barbara

[83] 2005年6月23日

T. Kamimura, M. Maeda, and K. Matsumoto,

"Staircase Characteristics of Carbon Nanotube Field Effect Transistors Desorbed Oxygen by Electrical Heating" The Electronic Materials Conference (EMC), University of California, Santa Barbara

[84] 2005年6月23日

D, Kaminishi, H. Ozaki, Y. Ohono, K. Maehashi, K. Inoue, K. Matsumoto, Y. Seri, A. Masuda, and H. Matsumura, "Air-Stable Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with Top-Gate Structures on SiNX Passivation Films Formed by Catalytic Chemical Vapor Deposition", The Electronic Materials Conference (EMC), University of California, Santa Barbara

[85] 2005 年 8 月 25 日 Chan Kyeong Hyon, "Island Size Control of Carbon Nanotube Single Electoron Transistor operating at Room Temperature by AFM Electrical Manipulation" NANO KOREA2005 KOREA

[86]2005 年 9 月 10 日 ケルマンカーン,奥野 潤,前橋兼三,松本和彦,高村 禅,民谷栄一 「マルチカーボンナノチューブ電極を用いたバイオセンシング」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[87]2005年9月8日

奥野 潤,前橋兼三,松本和彦,ケルマンカーン,高村 禅,民谷栄一 「カーボンナノチューブ電極の作製と生体分子計測への応用」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島) [88]2005年9月9日

村田克之,松本和彦

「電界効果トランジスタに用いるカーボンナノチューブの浄化」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[89]2005年9月9日

紙西大祐,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦,西崎昭吾,松村英樹,仁木敏一 「Cat-CVD 法により作製した SiNX 膜を有するカーボンナノチューブ FET の特性評価」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[90]2005年9月9日

藤原泰幸,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦 「レーザ照射 CVD 法による単層カーボンナノチューブの成長とその特性評価」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[91]2005年9月10日

上村崇史,永宗 靖,中西 毅,ヒョンチャンキョン,前田雅俊,松本和彦 「単層カーボンナノチューブの1次元サブバンド構造の電気伝導測定による観察」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[92]2005年9月10日

成実一樹,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦 「カーボンナノチューブを用いたスピンバルプ素子の作製(1)」 第66回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[93]2005年9月10日

大野恭秀 1,2, 成実一樹 1,2, 前橋兼三 1,2, 井上恒一 1,2, 松本和彦 1,2 「カーボンナノチューブ・スピンバルブ素子の試作(2) 異なった磁性電極効果」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[94]2005年9月10日

玄 燦慶,上村崇史,前田雅俊4,村田克之,松本和彦 「NC-AFM によるカ-ボンナノチュ-ブ SET の温度依存性」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[95]2005年9月10日

尾崎弘和,前橋兼三2,大野恭秀,井上恒一,松本和彦,関 修平,田川精一 「イオンビームを用いた室温動作カーボンナノチューブ単一電子デバイスの作製」 第66回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)

[96]2005年9月10日

前田雅俊,上村崇史, Chan Kyeong Hyon,松本和彦 「電流モニタによるカーボンナノチューブの成長本数制御」 第 66 回応用物理学関係連合講演会(徳島大学 徳島)

[97]2005年9月10日

井上恒一,大野恭秀,前橋兼三,松本和彦 「単層カーボンナノチューブ中の置換型酸素不純物による電子状態密度」 第 66 回応用物理学関係連合講演会、(徳島大学 徳島)
[98] 2005 年 9 月 15 日

Takafumi Kamimura, Kazuhiro Yamamoto, and Kazuhiko Matsumoto "Fermi Level Modulation of n-type Doped Single Walled Carbon Nanotube using Buried Local-Gate FET Structure by Oxygen Ion Implantation with Ultra-Iow Energy Ion Beam of 25eV", The 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Kobe

[99] 2005年9月15日

Daisuke Kaminishi, Hirokazu Ozaki, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, Kazuhiko Matsumoto, Yasuhiro Seri, Atsushi Masuda, Hideki Matsumura, and Toshikazu Niki, "Air-Stable p-Type and n-Type Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with Top-Gate Structure on SiNX Passivation Films Formed by Catalytic Chemical Vapor Deposition", The 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Kobe.

[100] 2005 年 9 月 15 日

C. K. Hyon, T. Kamimura, M. Maeda, K. Matsumoto, "Precise Control of Island Size for Carbon Nanotube Single Electron Transistor operating at Room Temperature by AFM Electrical Manipulation", The 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Kobe.

[101] 2005 年 9 月 15 日

Kenzo Maehashi, Kazuhiko Matsumoto, Kagan Kerman, Yuzuru Takamura and Eiichi Tamiya, "Direct Ultrasensitive DNA Sensors Based on Carbon Nanotube Field-Effect Transistors" The 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Kobe.

[102] 2005年9月15日

M. Maeda, T. Kamimura, C. K. Hyon, K. Murata, K. Matsumoto, "One by One Control of Number of Carbon Nanotube Growth by Current Monitoring", Late News, The 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Kobe.

[103]2006 年 3 月 24 日 前田雅俊,上村崇史,松本和彦 「Double Gate 構造を用いたカーボンナノチューブ FET プローブの作製」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[104]2006 年 3 月 24 日 前田雅俊,上村崇史,松本和彦 「電流モニタによるカーボンナノチューブの成長本数制御」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[105]2006年3月24日

西口浩平,前橋兼三,紙西大祐,村田克之,大野恭秀,井上恒一,松本和彦 「カーボンナノチューブ電界効果トランジスタの電気特性改善」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京) [106]2006年3月25日

ケルマンカーン,高村 禅,民谷栄一,奥野 潤,前橋兼三,松本和彦 「超高感度タンパク検出用非標識電気化学イムノアッセイ」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[107]2006年3月25日

浅井芳啓,藤原泰幸,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦 「レーザ照射 CVD 法による単層カーボンナノチューブの架橋成長」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[108]2006年3月25日

奥野潤,前橋兼三,松本和彦,ケルマンカーン,高村禅,民谷栄一 「高感度カーボンナノチューブ・アンペロメトリック抗原センサー」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[109]2006年3月25日

桂大侍,前橋兼三,松本和彦,ケルマンカーン,高村 禅,民谷栄一 「アプタマーを化学修飾したカーボンナノチューブ FET による IgE 抗体の高感度検出」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[110]2006 年 3 月 25 日 村田克之,阿部益宏,井福康夫,清水三聡,安宅龍明,松本和彦 「CNT-FET バイオセンサーによるたんぱく質の選択的なセンシング」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[111]2006年3月25日

阿部益宏,村田克之,井福康夫,清水三聡,安宅龍明,松本和彦 「ラテックス固定 PSA による CNT-FET バイオセンサーの感度向上」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[112]2006年3月25日

井上恒一,大野恭秀,前橋兼三,松本和彦 「置換型酸素不純物を含む単層カイラルカーボンナノチューブの電子状態」 第 53 回応用物理学関係連合講演会(武蔵工業大学 東京)

[113]2006年5月10日 J. Okuno, K. Maehashi, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura and E. Tamiya "High-sensitive label-free amperometric protein biosensors based on single-walled carbon nanotubes array modified microelectrodes." The 9th World Congress on Biosensors トロント カナダ

[114] 2006年5月11日 K.Maehashi, T.Katsura, K.Matsumoto, K.Kerman, Y.Takamura, E.Tamiya "Label-free protein biosensor based on aptamer-modified carbon natransistors" The 9th World Congress on Biosensors トロント カナダ

[115] 2006年6月28日 T.Katsura, K. Maehashi, K.Matsumoto, K.Kerman, Y.Takamura, E.Tamiya

"High-Sensitive Detection of Immunoglobulin E Using Aptamer-Modefied Carbon Nanotube Field-Effect Transistor " TMS 2006 Electronic Materials Conference ペンシルベニア州立大学 アメリカ [116] 2006年6月28日 K. Maehashi, H. Ozaki, Y. Ohno, K. Kouichi, K. Matsumoto, S. Seki, S. Tagawa " Carbon Nanotubes Single-Electron Transistor Fabricated with Focused-Ion-Beam Technique " TMS 2006 Electronic Materials Conference ペンシルベニア州立大学 アメリカ [117] 2006年6月27日 K. Maehashi, J.Okuno, K.Matsumoto, K.Kerman, Y.Takamura, E. Tamiya" Label-Free Amperometric Biosensors Based on Single-Walled Carbon Nanotube Modified Microelectrodes." 64th Device Research Conference ペンシルベニア州立大学 アメリカ [118]2006年6月28日 M.Maeda, T.Kamimura, K.Matsumoto "Precise Control of Nunber of Carbon Nanotube Growth by Digital Growth Process" 64th Device Research Conference ペンシルベニア州立大学 アメリカ [119] 2006年6月28日 M.Abe, K.Murata, A.Kojima, Y.Ifuku, M.Shimizu, T.Ataka, K. Matsumoto "Real-Time Sensing of Proteins by Using a Top-Gate CNT-FET Biosensor." TMS 2006 Electronic Materials Conference ペンシルベニア州立大学 アメリカ [120] 2006 年 8 月 4 日 K. Maehashi, J. Okuno, T. Katsura, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura and E. Tamiya "High-Sensitive Protein Biosensors Using Single-Walled Carbon Nanotubes." International Conference on Nanoscience and Technology NANO9 meets STM'06 \subset \mathcal{N} ーゼルコングレスセンター スイス [121] 2006 年 8 月 4 日 M. Abe, K. Murata, A. Kojima, Y. Ifuku, M. Shimizu, T. Ataka and K. Matsumoto "Selective Detection of Proteins by Using Top-Gate Carbon Nanotube Field Effect Transistor." International Conference on Nanoscience and Technology NANO9 meets STM'06 \subset \mathcal{N} ーゼルコングレスセンター スイス [122]2006年8月30日 奥野 潤,前橋兼三,松本和彦,小島慶裕,岸本 茂,水谷 孝 「PCVD法によるカーボンナノチューブ・アンペロメトリックバイオセンサーの開発」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県) [123] 2006年8月30日 奥野 潤,前橋兼三,松本和彦,ケルマンカーン,高村 禅,民谷栄一 「アレイ化したカーボンナノチューブ微小電極の微小流体デバイスへの応用」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[124] 2006 年 8 月 30 日

桂 大侍,前橋兼三,松本和彦,ケルマンカーン,高村 禅,民谷栄一 「CNTFETを用いたバイオセンシングにおける電気二重層の影響」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[125] 2006 年 8 月 30 日

阿部益宏,村田克之,井福康夫,清水三聡,安宅龍明,松本和彦 「バイオセンサーの定量化を目指した CNT-FET 上での抗原抗体反応の解析」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[126] 2006年9月1日

上村崇史,松本和彦

「 強磁性体電極からのトンネル注入による SWNT 共鳴トンネルトランジスタ特性」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[127] 2006年9月1日

浅井芳啓,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦

「絶縁酸化膜を用いたカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの作製」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[128] 2006 年 9 月 1 日 大野恭秀,浅井芳啓,前橋兼三,井上恒一,松本和彦 「絶縁酸化膜を用いたカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの作製」 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[129] 2006年9月1日
前田雅俊,上村崇史,松本和彦
「カーボンナノチューブの高温温度特性」
2006 年秋季 第67 回応用物理学会学術講演会 (立命館大学 滋賀県)

[130] 2006年9月15日

J. Okuno, K. Maehashi, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura and E. Tamiya "High-Sensitive and Label-Free Detection of Biomolecules Using Single-Walled Carbon Nanotube Modified Microelectrodes."

2006 International Conference on Solid State Device and Materials 横浜

[131] 2006年9月15日 T. Katsura, K. Maehashi, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura and E. Tamiya "DNA Aptamer-Based Biosensing of Immunoglobulin E Using Carbon Nanotube Field-Effect Transistors." 2006 International Conference on Solid State Device and Materials 横浜

[132] 2006年9月15日 M. Abe, K. Murata, A. Kojima, Y. Ifuku, M. Shimizu, T. Ataka and K. Matsumoto "First Selective Detection of Proteins Using Top-Gate Carbon Nanotube Field Effect Transistor." 2006 International Conference on Solid State Device and Materials 横浜

[133]2007年3月27日

權 赫彰,民谷栄一,高村 禅,辻田雄一,奥野 潤,前橋兼三,松本和彦 「PDMS 製簡易定量送液マイクロポンプの開発とバイオセンサへの応用」 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川))

[134]2007年3月28日

阿部益宏,村田克之,井福康夫,清水三聡,安宅龍明,松本和彦 「絶縁膜に抗体を直接固定した CNT-FET バイオセンサー」 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川))

[135]2007年3月28日

辻田雄一,奥野 潤,前橋兼三,松本和彦,權 赫彰,高村 禅,民谷栄一 「カーボンナノチューブ電極を有するマイクロフロー・バイオチップの作製」 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川)

[136]2007年3月29日

岩崎晋,上村崇史,前田雅俊,松本和彦,三浦登

- 「プラズマ欠陥導入した CNT による室温動作単一電子トランジスタ」
- 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川)

[137]2007年3月30日

西口浩平,前橋兼三,大野恭秀,井上恒一,山本和弘,松本和彦

「保護膜を有するカーボンナノチューブ電界効果トランジスタへのイオン照射による伝達 輸送特性の評価」

第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川)

[138]2007年3月30日

浅井芳啓,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦

「絶縁酸化膜を有するカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの評価」

第 54 回応用物理学関係連合講演会 (青山学院大学 相模原キャンパス 神奈川)

[139]2007年5月21日

K. Matsumoto and T. Kamimura

"Quantum Nano Devices using Carbon Nanotube."

31th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits Venice, Italy, May 20-23, 2007

[140]2007年5月21日

K. Maehashi, T. Katsura, K. Matsumoto, K. Kerman, Y. Takamura and E. Tamiya "High-sensitive Label-free Biosensors Based on Carbon Nanotube Field-effect Transistors Modified with Aptamers."

2007 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Santa Clara, California, USA,

[141]2007年5月21日

Y. Ohno, Y. Asai, K. Maehashi, K. Inoue and K. Matsumoto"Coulomb Oscillations at Room-Temperature of Single-Walled Carbon Nanotube Field-Effect Transistors" 2007 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Santa Clara, California, USA,

[142]2007年6月21日 Masuhiro Abe, Katsuyuki Murata, Tatsuaki Ataka and Kazuhiko Matsumoto

"Characteristics of Carbon Nanotube Field-Effect Transistor Biosensor without Top-Gate Metal Electrode." 49th Electronic Materials Conference University of Notre Dame, Indiana, USA, June [143]2007年6月21日 Masatoshi Maeda, Takafumi Kamimura, Shin Iwasaki and Kazuhiko Matsumoto "Determination Method of Energy Band Gap of Carbon Nanotube by High Temperature Dependence of Current." 49th Electronic Materials Conference University of Notre Dame, Indiana, USA, June [144]2007年6月20日 Shin Iwasaki, Takafumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto and Noboru Miura "Room Temperature CNT Single Electron Transistor Formed by Plasma Induced Defect Process." 49th Electronic Materials Conference University of Notre Dame, Indiana, USA, June [145]2007年6月21日 T. Kamimura, Y. Ohno, and K. Matsumoto " Gate Voltage Dependent Random Telegraph Signals in Single-Walled Carbon Nanotube Single-Hole Transistor" 49th Electronic Materials Conference University of Notre Dame, Indiana, USA, June [146]2007年9月5日 虎井総一朗,近江みゆき,高村 禅,辻田雄一,前橋兼三,松本和彦,民谷栄一 「CNT 電極を用いたポンプ内蔵型多項目バイオセンサーの開発」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [147]2007年9月5日 山本泰己,桂、大侍,前橋兼三,松本和彦 「カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ型バイオセンサによるアミノ酸の検出」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [148]2007年9月5日 「カーボンナノチューブ電極を有する微小流体チップを用いた生体分子の検出」 辻田雄一,前橋兼三,松本和彦,民谷栄一,虎井総一郎,近江みゆき,高村 禅 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [149]2007年9月6日 上村崇史,大野泰秀,松本和彦 「単層カーボンナノチューブ単正孔トランジスタによる単電荷遷移過程の検出」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [150]2007年9月6日 大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦 「CNT-FET の交流電圧印加によるノイズ低減」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [151]2007年9月6日

桂、大侍,山本泰己,前橋兼三,松本和彦

「溶液中で動作する微細トップゲート構造型カーボンナノチューブ電界効果トランジスタ の特性評価」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [152]2007年9月6日 岩崎 晋,大野恭秀,前橋兼三,井上恒一,松本和彦「ナノ粒子リソグラフィーによる規 則的配列された触媒金属粒子の作製」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [153]2007年9月7日 前田雅俊,上村崇史,村田克之,松本和彦 「La 化合物によるカーボンナノチューブの欠陥導入制御」 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (北海道工業大学 北海道) [154]2007年9月21日 T. Kamimura, Y. Ohno and K. Matsumoto " Single charge sensitivity of single-walled carbon nanotube single-hole transistor " 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007)Tsukuba, Ibaraki [155]2007年9月21日 M. Maeda, T. Kamimura, S. Iwasaki, K. Matsumoto "New Measurement Method of Carbon Nanotube Energy Band Gap" 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007)Tsukuba, Ibaraki [156] 9月24日 Y. Tsujita, K. Maehashi, K. Matsumoto, H. Kwon, Y. Takamura E. Tamiya " Microfl uidic Amperometric Biochips Based on Carbon Nanotube Arrayed Electrodes " 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007)Tsukuba, Ibaraki [157]2007年10月18日 K. Matsumoto "Single Charge Sensing by Carbon Nanotube Single-Hole Transistor" AVS (American Vacuum society) 54th International Symposium Seattle, WA, USA 富士通グループ (1)2003年7月21日 Y. Yamaguchi, A. Kawabata, M. Nihei, and Y. Awano (富士通、富士通研、CREST/JST) "Noncovalent Chemical Modification of Sidewalls of Carbon Nanotubes for Application to Biosensors" CREST & QNN03 Joint International Workshop、Awaji、Japan、2003 年 7 月 21 日 (2)2005年4月1日 浅野高治、中村俊二、粟野祐二(富士通、富士通研、CREST/JST)、「極短波長 UV 光による

MWNT のドライプロセスによる化学修飾」,2005 年春季第 52 回応用物理学関係連合講演 会、埼玉大学

(3)2005年9月12-15日

Koji Asano, Daiyu Kondo, Akio Kawabata, Fumio Takei, Mizuhisa Nihei and Yuji Awano, "Chemical Modification of Multi-walled Carbon Nanotubes (MWNTs) by Vacuum Ultra-violet(VUV) Irradiation Dry Process"

International Conference on Solid-State Devices and Materials 2005 (SSDM2005), Kobe, Japan,

(4) 2006 年 3 月 21 日
山口佳孝,岩井大介,近藤大雄,佐藤信太,粟野祐二(富士通研,富士通,CREST/JST),「CNT-FET 特性に対する表面トラップ除去効果」
2006 年春季第 53 回応用物理学関係連合講演会,武蔵工業大、2006 年 3 月 21 日

ポスター発表 (国内会議 0件、国際会議 18件)

産総研・阪大グループ

[1] 2004 年 7 月 27 日

K. Matsumoto, T. Kamimura

"Coexistence of ballistic transport and Coulomb blockade effect of hole in 4 \cdot m carbon nanotube channel transistor"

International Conference on Physics of Semiconductor (ICPS) Northern Arizona University.

[2] 2004 年 7 月 27 日

Y. Ohno, K. Maehashi, K. Inoue, K. Matsumoto, A. Saeki, S. Seki, S. Tagawa, "Transport property of charge carriers in single-walled carabon nanotubes by pulse-radiolysis time-resolved microwave conductivity technique" International Conference on Physics of Semiconductor (ICPS) Northern Arizona University.

[3] 2004 年 8 月 24 日

C. K. Hyon, T. Kamimura, A. Kojima, M. Maeda, K. Matsumoto, "The application of AFM electrical manipulation to the fabrication of room temperature operating carbon nanotube SET", NANO KOREA 2004 Symposium and Exhibition.

[4] 2005年6月27日

K. Maehashi, Y. Ohno, K. Inoue, K. Matsumoto, "Laser-Irradiated Chemical Vapor Deposition for Position- and Chirality-Controlled Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes", Nanotube 05, Sweeden

[5] 2005年7月1日

Kenzo Maehashi Kazuhiko Matsumoto, Kagan Kerman, Yuzuru Takamura and Eiichi Tamiya, "Ultrasensitive Real-time DNA Sensors Based on Carbon Nanotube Field-Effect Transistors Modified by Peptide Nucleic Acid", Nanotube 05, Sweeden

[6] 2006 年 7 月 25 日 K. Inoue, Y.Ohno, K.Maehashi, K.Matsumoto "Electronic states of Single-walled carbon nanotubes with substitutional impurities." (28th International Conference on the Physics of Semiconductors 、ホフバーフ宮 殿 ウィーン) [7] 2006年7月25日 Y. Ohno, K.Narumi, K.Maehashi, K. Inoue, K. Matsumoto "Spin injection to single-walled carbon nanotubes through thin tunnel barriers." 28th International Conference on the Physics of Semiconductors 、ホフバーフ宮殿 ウィーン [8] 2006年7月25日 K.Nishiguchi, Y.Ohno, K.Maehashi, K.Inoue, K. Matsumoto "Edge-Contact Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with No Hysteresis Characteristics." 28th International Conference on the Physics of Semiconductors 、ホフバーフ宮殿 ウィーン [9] 2006 年 8 月 1 日 Y. Asai, Y. Fujiwara, K. Maehashi, Y. Ohno, K. Inoue, K. Matsumoto "Growth of Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes by Laser-Irradiated Chemical Vapor Deposition." International Conference on Nanoscience and Technology NANO9 meets STM'06 、バ ーゼルコングレスセンター スイス [10] 2006年8月2日 K. Matsumoto "Ideal Control of Carbon Nanotube Field Effect Transistor Characteristics." International Conference on Nanoscience and Technology NANO9 meets STM'06 \subset \mathcal{N} ーゼルコングレスセンター スイス [11]2007年7月4日 T. Kamimura, Y. Ohno and K. Matsumoto "Magnetoresistance in quantum interference regime of single walled carbon nanotube" International Conference on Nanotechnology 2007 Stockholm SWEDEN [12]2007年7月4日 Masatoshi Maeda, Kazuhiko Matsumoto, Takafumi Kamimura, Shin Iwasaki "Determination method of energy band gap of carbon nanotube by high temperature dependence of current" International Conference on Nanotechnology 2007 Stockholm SWEDEN [13]2007年10月16日 M. Maeda, T. Kamimura, S. Iwasaki, K. Matsumoto

" Detamination Method of Energy Band Gap of Carbon Nanotube "

The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) Kyoto [14]2007年10月16日 Takafumi Kamimura Yasuhide Ohno and Kazuhiko Matsumoto "Detection of Fluctuating Single-Charge near Channel of Single-Walled Carbon Nanotube Single-Hole Transistor" The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) Kyoto [15]2007年10月16日 Kenzo Maehashi, Jun Okuno, Taiji Katsura, Kazuhiko Matsumoto, Kagan Kerman, Yuzuru Takamura, and Eiichi Tamiya "High-sensitive Carbon Nanotube Protein Sensors" The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) Kyoto [16]2007年10月16日 Yoshihiro Asai, Yasuyuki Fujiwara, Kenzo Maehashi,Yasuhide Ohno, Koichi Inoue, Kazuhiko Matsumoto "Laser-Irradiated Chemical Vapor Deposition for Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes" The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) Kyoto

[17]2007年10月16日

Kohei Nishiguchi, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi,Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto "Improvement of Hysteresis Characteristics in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors"

The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) Kyoto

富士通グループ

[1] 2007 年 9 月 19-21 日

I. Soga, M. Norimatsu, D. Kondo, Y. Yamaguchi, S. Sato, T. Iwai and Y. Awano (Fujitsu Limited, Fujitsu Laboratories Ltd., CREST/JST),

"CNT-FETs with High Modulated Drain Current utilizing Size-classified Fe Particles as a Catalyst", International Conference on Solid-State Devices and Materials 2007 (SSDM2007), Tsukuba, Japan, 2007, 9/19-21

(4)特許出願

国内出願 (17件)

- (1)「バイオセンサー」
 - 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所 出願日 2003年5月23日 出願番号 特願2003-146480 発明者 松本和彦、武笠幸一、末岡和久、澤村誠、アグス・スバギョ 細井浩貴、武田晴浩
- (2)「単一電子型トランジスタ、電界効果型トランジスタ、センサー、センサーの 製造方法ならびに検出方法」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所
 出願日 2004年2月16日
 出願番号 特願2004-37866
 発明者 松本和彦、武笠幸一、澤村誠、石井睦美、末岡和久、アグス・スバギョ 細井浩貴、武田晴浩、喜田宏、迫田義博
- (3)「電界効果トランジスタ及び単一電子トランジスタ並びにそれを用いたセンサ」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 三菱化学株式会社
 出願日 2003 年 8 月 29 日
 出願番号 特願 2003-307798 号
 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲、加藤尚範、
 山田豊、長池一博、井福康夫、三谷浩
- (4)「光検出素子」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所
 出願日 2003 年 7 月 18 日
 出願番号 特願 2003-199225
 発明者 松本和彦 永宗靖
- (5)「チューブ状物質を用いた電子デバイスの製造方法」
 出願人 科学技術振興事業団、産業技術総合研究所
 出願日 平成 15 年 7 月 9 日
 特許願 第 2003-163073 号
 発明者 山本和弘、松本和彦、上村崇史
- (6)「ナノスケール物質の構造制御方法」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構、産業技術総合研究所
 出願日 2003 年 8 月 29 日
 出願番号 特願 2003-307602
 発明者 前橋兼三、井上恒一、松本和彦、大野恭秀
- (7)「カーボンナノチューブ単一電子バイオセンサー」 出願人 科学技術振興機構、産業技術総合研究所 出願日 平成 16年2月16日 出願番号 2004-37866号 発明者 松本和彦、武笠幸一、石井睦、武田清治、澤村誠、アグス・スバギョ、 細井浩貴、末岡和久、喜田宏、迫田義博、

(8)「カーボンナノチューブ含有金属薄膜」

出願人 独立行政法人科学技術振興機構、大阪大学 出願日 2004 年 3 月 24 日 発明者 前橋兼三、松本和彦、大野恭秀、井上恒一 出願番号 特願 2004-08805 号

- (9)「ナノスケールの低次元量子構造体の製造方法、及び、当該製造方法を用いた集積回路の製造方法」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構
 出願日 2004年8月31日
 出願番号 特願2004-253518
 発明者 藤原泰幸、前橋兼三、井上恒一、松本和彦、大野恭秀
- (10)「センサユニット及び反応場セルユニット並びに分析装置」 出願人 科学技術振興機構、三菱化学株式会社 出願日 2004年9月3日 出願番号 特願2004-257698 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲、加藤尚範、井福康夫、 三谷浩、齋藤靖代

(11)「n型トランジスタ、n型トランジスタセンサ及びn型トランジスタチャネルの製造方法」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 三菱化学株式会社
 出願日 2005年2月10日
 出願番号 特願2005-34476
 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲

- (12)「ナノスケールの低次元量子構造体の製造方法、及び当該製造方法を用いた 集積回路の製造方法」
 - 出願人 科学技術振興機構 出願日 2005年8月30日 出願番号 特願2006-532726 発明者 前橋兼三、藤原泰幸、井上恒一、松本和彦、大野恭秀
- (13)「電界効果トランジスタの製造方法及び電界効果トランジスタ」
 出願人 大阪大学
 出願日 2006年2月27日
 出願番号 特願2006-051184
 発明者 松本和彦、井上恒一、前橋兼三、大野恭秀
- (14)「記憶素子及びその読み出し方法」
 出願人 科学技術振興機構 産業技術総合研究所
 出願日 2007年5月24日
 出願番号 特願2007-138470
 発明者 林豊、松本和彦、上村崇史

(15)「ボルタノメトリック型バイオセンサ」

出願人 三菱化学ヤトロン 出願日 2007 年 5 月 18 日 出願番号特願 2007-133526 発明者 松本和彦、前橋兼三、井福康夫、村井長元

(16)「アンペロメトリック型バイオセンサ」
 出願人 三菱化学ヤトロン
 出願日 2007 年 5 月 18 日
 出願番号特願 2007-133527
 発明者 松本和彦、前橋兼三、井福康夫、村井長元

富士通グループ

(1)「光化学処理装置及び光化学処理方法」
 出願人 富士通
 出願日 平成 17 年 10 月 7 日
 出願番号 2005 - 295291
 発明者 浅野 高治、武井文雄

(2)「絶縁膜で被覆されたカーボンナノチューブ構造体の製造方法及びその構造体からなる電界 効果トランジスタ装置」

> 出願人 富士通 出願日 平成 18 年 9 月 29 日 出願番号 2006 - 269877 発明者山口佳孝、岩井大介

海外出願(8件)

(1)「バイオセンサー」

出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所 出願日 2004年5月21日 出願番号 PCT/JP2004/007300 発明者 松本和彦、武笠幸一、末岡和久、澤村誠、アグス・スバギョ 細井浩貴、武田晴浩

- (2)「単一型トランジスタ、電界効果型トランジスタ、センサー、センサーの製造方法なら びに検出方法」
 - 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所
 - 出願日 2004年5月21日
 - 出願番号 PCT/JP2004/007300
 - 発明者 松本和彦、武笠幸一、末岡和久、澤村誠、アグス・スバギョ 細井浩貴、武田晴浩

- (3)「光検出素子」
 - 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 産業技術総合研究所 出願日 2004 年 7 月 15 日 出願番号 PCT/JP2004/010428 発明者 松本和彦 永宗靖
- (4)「電界効果トランジスタ及び単一電子トランジスタ並びにそれを用いたセンサ」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 三菱化学株式会社
 出願日 2004 年 8 月 27 日
 出願番号 PCT/JP2004/12402
 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲、加藤尚範、
 山田豊、長池一博、井福康夫、三谷浩
- (5)「カーボンナノチューブ含有金属薄膜」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構、大阪大学
 出願日 PCT/JP2005/004938
 発明者 前橋兼三、松本和彦、大野恭秀、井上恒一
 出願番号 特願 2004-08805 号
- (6)「ナノスケールの低次元量子構造体の製造方法、及び当該製造方法を用いた 集積回路の製造方法」
 - 出願人 科学技術振興機構 出願日 2005年8月30日 出願番号 PCT/JP2005/015776 発明者 前橋兼三、藤原泰幸、井上恒一、松本和彦、大野恭秀
- (7)「センサユニット及び反応場セルユニット並びに分析装置」
 - 出願人 科学技術振興機構、三菱化学株式会社
 - 出願日 2005年9月1日
 - 出願番号 PCT/JP2005/15983
 - 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲、加藤尚範、井福康夫、 三谷浩、齋藤靖代
- (8)「n型トランジスタ、n型トランジスタセンサ及びn型トランジスタチャネルの製造方法」
 出願人 独立行政法人科学技術振興機構 三菱化学株式会社
 出願日 2006年2月10日
 出願番号 PCT/JP2006/302349
 発明者 松本和彦、小島厚彦、長尾哲

(5)受賞等 受賞

産総研・阪大グループ

1. 2004 IEEE EDS Japan Chapter Student Award

"Fabrication and I-V Characterization of Carbon Nanotube Single Electron Transistor Operated at Room Temperature" Takafumi Kamimura 平成16年1月 2. Best poster award (NANO KOREA 2004, 2004 International Nanotech Symposium & Exhibition in Korea) C. K. Hyon, T. Kamimura, A. Kojima, M. Maeda, K. Matsumoto 平成16年8月 3. 2005 IEEE EDS Japan Chapter Student Award "Coherent Transport of Hole in p-type Semiconductive Carbon Nanotube " Takafumi Kamimura 平成17年1月 4. 2006 IEEE EDS Japan Chapter Student Award "Electrical Observation of One Dimensional Sub-band Structure of Carbon Nanotube in Schottky Barrier Transistor" Takafumi Kamimura 平成 18 年 1 月 5. 平成 18 年 4 月 応用物理学会講演奨励賞 前田 雅俊 筑波大学 電流モニタによるカーボンナノチューブの成長本数制御 (産総研1,筑波大2,阪大3,CREST/JST4:上村 崇史3,4,玄 燦慶4,松本 和彦1,3,4) 富士通グループ 1.2005 年 9 月 7 日 応用物理学会 第 27 回(2005 年度) 論文賞、解説論文賞 粟野 祐二 富士通 カーボンナノチューブの電子デバイス応用

新聞報道

1.	阪大、産総研、JST、CNT 素子の新作製法開発 電流変動 1/1000 に					
	日刊工業新聞 平成18年3月1日					
2.	ナノテク駆使 感度 10 倍、阪大が次世代トランジスタ実用化へ					
	フジサンケイビジネスアイ 平成18年3月1日					
3.	阪大 産総研、CNT トランジスタの安定動作実現、実用可能レベル					
	化学工業日報新聞 平成18年3月1日					
4.	高性能素子の新製法を開発 阪大グループ					
	朝日新聞 平成18年3月10日					
5.	大阪大と産総研 従来の 1000 倍以上安定動作					
	電波新聞 平成18年3月14日					
6.	阪大、産総研、JST、電流 1/1000 の CNT-FET 試作					
	DNA などの超高感度バイオセンサーに道					

日経ナノビジネス平成18年3月27日 No.34, pp20~21
7.阪大と産総研 微量血液で病気診断 感度100倍のバイオセンサー 日経産業新聞 平成18年6月23日
8.CNTでバイオセンサー 阪大など がん・肝炎、早期発見へ 日刊工業新聞 平成18年12月26日

その他

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
17 年 7 月 21 - 23	CREST&QNN03 ジョイン ト国際ワークショップ	兵庫県立淡 路夢舞台国 際会議場	140 名	国内外の優れたナノテ クノロジー研究者との議 論を深めるとともに、ナノ テクノロジーと電子、光子 を用いた量子情報処理の 方向性について洞察する
18年10月10 日 12日	JST領域横断ワーク ショップ	飯岡高原ホ テルアルカ ディア	90名	カーボンナノチューブに 関する基礎デバイス応用 に関するワークショップ を行って情報を交換する

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

- NEDO ナノテク・先端部材実用化研究開発
 パーソナル QOL システムのための CNT 超高感度生体分子センサーの研究開発」
 平成17年~平成19年
- 2) 松下電工「機械センサーの共同研究開発」(企業との共同研究費)
- 3) シュルンベルジュ「探査センサーの共同研究開発」(企業との共同研究費)
- 4) 科研費 基盤 C「カーボンナノチューブ多項目高感度バイオセンサーアレイの開発」 平成19年~平成20年
- 5) 科研費 特定領域研究「カーボンナ/チューブ ナ/エレクトロニクス」 「カーボンナ/チューブバイオセンサー」計画班代表 平成19年~平成23年

(2)実用化に向けた展開

1) オリンパスおよび三菱化学ヤトロンとは、カーボンナノチューブを用いたバイオセンサーの共

同研究開発を行い、CRSET 終了後も継続して行っている。オリンパスとは NEDO の研究開 発費を共同で受諾している。

- 2) 松下電工とは FET タイプの構造を用いた機械センサーを開発中である。企業との関係で残 念ながら詳細が述べられません。
- シュルンベルジュとは、FET タイプの構造を用いた探査センサーを開発中である。企業との 関係で残念ながら詳細が述べられません。
- 9 他チーム、他領域との活動とその効果 (1)領域内の活動とその効果 なし

(2)領域横断的活動とその効果なし

10 研究成果の今後の貢献について (1)科学技術の進歩が期待される成果

本研究開発で、カーボンナノチューブを用いた量子デバイスにおいて、単一電子トラン ジスタの室温動作やコヒーレント伝導、1次元量子伝導の観察に成功した。

この中で、従来カーボンナノチューブで観察されなかった一次元量子伝導の階段特性を、 明瞭に観察できた事は注目に値する。また単一電子トランジスタにおいて、従来になかっ た規則的なクーロンダイアモンド特性を室温で得られた事は、今後の単一電子トランジス タの将来を楽しみなものにする結果である。さらに、コヒーレント伝導と単一電子伝導の 共存を明確に測定でき、条件により両伝導特性を制御できる事を明確にした点も、科学技 術のブレークスルーになると思われる。このコヒーレント伝導を利用して、単一の電荷の検出に成 功した。この技術をバイオセンシングへ活用することで、より高感度な検知、単一分子の 検知、バイオの単一電荷の検知が可能になると考えられ、これも将来フロンティアの開拓につ ながると思われる。

本研究において、レーザー消去法でカイラリティーを制御できることを初めて示した点も 非常に大きな科学技術のブレークスルーである。今後本技術がより発展して、カイラリティー制御 成長へつながる事により、より大きな科学技術上のプレークスルーが期待できる。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

本研究開発で成功したCNT FETの安定化動作の作製プロセスは、CNTFETの信頼性向上と、 実用化にとって必要不可欠なものであり、極めて重要な成果である。この成果はCNTFETが 実用化された時点で、必ず使われる技術になることは間違いなく、実用化の上で重要なキー ポイントになるであろう。CNTFETは、バイオセンサーや光センサー、機械的なセンサーと して高感度特性を示すため、広範囲にわたって今後の社会に貢献できるものと考えられる。

本研究開発で開発に成功したFET型のバイオセンサーは、従来の手法を越える最高の感度 が得られ、CNTFETセンサーの将来性を窺わせる結果が得られている。今後、素子の再現性、 集積化が可能になれば、爆発的に応用展開は拡がり、社会に貢献できると期待できる。

CNT を電極とする高感度バイオセンサーは、カーボンナノチューブの特長をうまく利用 しているため、作製が極めて容易であり、しかも高感度特性が得られる。従って本デバイ スが近い将来実用化できる事は間違いなく、本センサーが実用化すれば生活の質の向上に 資するため、社会の発展に大きく貢献できると期待される。 11 結び

CREST が採択された当初、この巨額な研究費をいただいて、果たしてこの研究費に見合った責任ある成果を出せるかどうか非常に不安であった。しかしながら多くの優れた若手研究者の努力と活躍によって、思っても見なかった様なすばらしい成果が次々と生み出され、2年目ごろからようやくなんとか責任を果たせそうだという自信がついてきた。

大阪大学では、研究開始時期、実験室には30万円のカーボンナノチューブ成長炉が一つきりし かなく、見学に来た何人もの旧知の友人が何も言わずにさびしそうに笑っていかれたのが昨日のよ うである。領域事務所のご助力により、研究施設の充実は添付の写真のように目を見張るばかりに 整備され、他研究室から装置の使用を希望する声しきりの状況になっている。海外や企業からの 見学者も施設のすばらしさをうらやんでいかれる事、多々である。このような環境で研究できたこと は、本当にありがたいことであり、感謝しつくしてもしきれないほどである。

研究とは意外なもので、初期には考えなかった様な一次元伝導やコヒーレント伝導、電極をカー ボンナノチューブとするバイオセンサーなどの研究展開があり、非常に楽しむ事ができた。CREST のすばらしい点は、このような計画外の研究展開を非常に大きな目で見ていただける、というよりも 非常に高く評価していただける点であると言える。計画外の研究をヒステリックに否定する様な他の 研究資金もあり、CREST はこれに比べて雲泥の差である。どちらが最終的にすばらしい成果を出 せるは明らかである。研究から自由を奪っては、思いがけない成果が埋もれてしまう。

本 CREST を遂行する際、多くの様々な研究者の方が、当初思っても見なかった新しいアイデア を持ち寄ってこられて、様々な共同研究が成り立った。光センサー、イオン注入、アンペロメトリック バイオセンサーなどがその最たるものである。研究資金が豊富であると自由に共同研究ができ、幅 広い研究展開ができる。この共同研究で多くの新しい知己を得た事も極めて重要な成果である。

研究の目標等から見た達成度としては、多くの予想外に進展した成果が得られたが、まだもっといい結果がでたはずであり、悔しい思いもしている研究もあり、総体として80点ぐらいと考えられる。 CRESTの巨額な研究費に対する責任は果たせたものと自負していいと思います。

本 CREST 研究遂行上で様々な事を学び取ったが、研究の上で最も大切な事は、「研究者の人格」であるというのが結論である。多くの素晴らしい方々と研究できた事は最上の幸せである。

最後にこの素晴らしい研究の機会を与えてくださった、梶村研究総括、評価委員の先生方、領域 事務所の篠原さん、山之内さん、木田さん、横田さんに、最大限の感謝を示して、報告書の終了と させていただきます。

本当にありがとうございました。



長野飯綱高原での CREST 合同研究会 2006 年10月



大阪大学 2007 年のメンバー



産業技術総合研究所メンバー。2004年春。前列左端は韓国からのポスドク、ヒョンさん。現在、サムスン電子で DRAM 開発に従事。日本の脅威に?



淡路島 人形浄瑠璃 2003 年 7 月。外国人に非常に好評であった。



鳴門の渦潮 2003年7月。7月は渦潮がとても小さく羊頭狗肉。行くなら4月の満月と学習。



QNN03 国際会議のバンケット。淡路夢舞台。2003 年 7 月





電子計測室



露光室

蒸着装置



クリーンルームと様々な CVD 装置



自分の研究室で持てるとは思わなかった電子ビーム露光装置。



ナノチューブに必要不可欠な電子顕微鏡。