

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

松井 真二 (兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 教授)

主たる共同研究者

柳沢 淳一 (大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授)

市橋 鋭也 (日本電気(株)ナノエレクトロニクス研究所 主任研究員)

藤田 淳一 (筑波大学大学院数理物質科学研究科 准教授)

知京 豊裕 ((独)物質・材料研究機構半導体材料センター センター長)

3. 研究内容及び成果

本研究課題は、集束イオン・電子ビーム励起反応堆積技術(FIB・EB-CVD)を用いて、ナノ立体構造形成プロセス技術の開発および「高機能ナノ立体構造電子・機械・光・バイオデバイス」の創生を目的としている。研究グループは、(1) ナノ立体構造形成技術(松井)グループ、(2) 材料構造物性評価(知京、柳沢)グループ、(3) 立体ナノ構造特性評価(市橋、藤田)グループ、(4) 立体ナノ構造形成の応用(松井)グループ、で構成された。

(1)ナノ立体構造形成技術

自由立体ナノ造形を可能とする3次元描画システムを独自開発した。3D-CAD で作成したサーフェースモデルからスキャンデータ(スライスデータおよびボクセルデータに分割)に変換させ、FIB-CVD で離散的に描画することでFIB-CVDにより、任意の立体構造物を造形する立体ナノ構造描画システムのハードおよびソフトを独自開発した。

(2)材料構造物性評価

フェナントレンをカーボンソースとして用いてFIB-CVD法で作製した薄膜の基本構造がイオン源に用いたGaを含むダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜であることを確認した。これがアニールにより局所構造が変化する様子を解明し、この変化が物性にどのように影響するかを突き止めた。微視的にGaがDLC膜中から脱離する過程を観測し、FIB-CVD DLC膜中のGa原子はC=C二重結合を開裂して炭素骨格に結合し、Ga原子が脱離することでC=C二重結合が再構成されることを突き止め、DLC薄膜の成膜過程と熱処理による構造変化の過程を明らかにした。

AuまたはSiイオンを用いたFIB-CVD法による堆積物形成のGaを用いた場合との違いはどのように現れるかを明らかにするために、フェナントレンガス雰囲気下でのAuまたはSiFIB照射による堆積物形成の確認と、イオン種による堆積物形成プロセスの違いや堆積物の物性の評価を行った。

(3)立体ナノ構造特性評価

FIB-CVDで合成されるナノ構造体の重要な応用分野がナノメカニクスに対応した構造体材料である。ナノピンセットによる細胞オルガネラの操作や、ナノ振動子による微量物質検出など、いずれの場合も機能の最適化には、ナノ構造体の硬さを十分に制御する必要がある。さらに研究の中でFIB-CVD構造体はタングステンカーバイドを凌駕する硬さを有していることを明らかにした。

FIB/EB-CVDにより形成したアモルファスカーボン中を動く鉄微粒子の移動に伴うカーボンナノ構造体固相

反応からカーボンナノチューブの成長メカニズム解明に関わる現象を見出した。ビーム励起反応により形成したアモルファス炭素の結晶化により、不完全ながらも多層ナノチューブを形成できる可能性を見出した。本技術を用いることにより、任意の位置、方向、長さ、さらには直径をもつカーボンナノチューブを形成できる可能性があり、電子デバイスやセンサーなどへの応用が期待できる。

#### (4)立体ナノ構造形成の応用

FIB-CVD により以下の立体ナノ構造体を試作し、応用の可能性を示した。

##### 空中配線

集束イオンビーム装置に計算機制御パターン描画発生装置を付加してビームのスキャン方向と速度、ブランキングを制御することにより、ナノスケールの空間内に堆積物を成長させる 3 次元ナノ配線作製を行った。さらに、各デバイス間を空中配線で相互接続することで、3 次元情報ネットワーク実現の可能性を示した。

空中配線技術の応用として、電子線バイプリズムの作製を行った。FIB-CVD による空中配線技術を用いることにより、これまでよりさらに細いワイヤー径 80nm の電子線バイプリズムの作成に成功した。このバイプリズムを用いてコントラスト、縞質共に良好な干渉像を得た。

##### 微小電子エミッター

2 端子電極を有したガラスキャピラリー上に FIB-CVD を用いて微小電子エミッタの作製を行った。冷陰極である DLC チップ先端の曲率半径は 50nm であり、DLC チップ先端と DLC アノードの距離は 500nm である。電界電子放出特性評価を行った結果、180V を閾値電圧として電子放出が起こった。また、測定した I-V 曲線からの F-N プロットにより測定電流が電界電子放出である事を確認した。

##### 静電アクチュエータ

静電反発力を利用したナノピンセットを作製・評価した。電圧印加によってコイル構造に蓄積した電荷が、コイル構造が周期的に重なっているため静電的に反発し、電圧を ON/OFF することで伸縮するアクチュエータとして機能させることができる。このコイル型静電アクチュエータの伸びを 0-500V の範囲で制御することができた。このアクチュエータの動作確認を光学顕微鏡下で行った。その伸び率は約 1.7nm/V であり、ナノレベルでの制御が可能であった。

##### ナノコイル

FIB-CVD による独自の立体ナノ構造形成技術を用いて、3 次元ナノシステム(NEMS)の基本構成部品として重要である、世界最小の DLC ナノスプリングの作製に成功した。DLC ナノスプリング特性は、横弾性係数 70GPa、ヤング率 184GPa と通常の鋼スプリングと同様の高強度・高弾性およびマイクロメートルの伸縮特性を示し、その実用性を実証した。

##### バイオナノツール

バイオ・ナノインジェクターの先端を目的に合った形状にすることにより、細胞内の細胞小器官などに直接、選択的に試薬などを注入することも可能になると考えられる。さらに、バイオ・ナノインジェクターは注入、吸引プロセスを細胞小器官の大きさや形状に合わせ精確に作製できるので、実験精度の向上が期待できる。これまでの市販のガラスキャピラリー先端径は 1 - 0.5  $\mu\text{m}$  であるが、FIB-CVD により先端径 100-30nm のバイオ・ナノインジェクター作製を可能にした。

一つの葉緑体内部やチラコイド膜の働きを調べることによって光合成のより詳細なメカニズムを知ることができれば、太陽電池やバイオハイブリッドデバイスなどへの工学的応用が期待できる。本研究では、バイオナノツールとして、葉緑体の単一操作および計測を実現するために、単一葉緑体の任意操作を目的としたフィルタリングツールおよび葉緑体局部位の計測を目的とした生体ナノ計測電極に関する研究を行った。

#### 4. 事後評価結果

4 - 1 . 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

原著論文		招待講演		通常講演		ポスター発表		その他		特許出願	
国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内
54	4	18	17	46	56	51	39	0	18	2	12

3次元CADデータから、FIB堆積特性を考慮した描画データ変換ソフトにより、ルーチンワークとしてトップダウンの手法により自由自在に3次元微細構造体を製作できる技術開発を行い、堆積構造・材料の機械的、電気的特性評価や化学的評価などにより、物性面での知見も明らかにしたことは評価される。さらに、堆積したカーボンナノピラー中を鉄ナノ粒子がマイグレートし、多層カーボン膜が形成される様子をTEMによりその場観測して明らかにし、ナノチューブ生成に対する制御の可能性を示したことも注目される成果である。

通常の発想では考えられないような3次元微細構造を形成するという発想は国際的にも高いオリジナリティを持っており、こだわりをもって作ったナノ構造体の水準は高い。現在の所応用としてメカニカルなものに限定されているのはやむを得ないと思われる。今後、必然的に混入するガリウムを利用したガリウム系半導体への再度挑戦等を期待する。

論文発表、招待講演を含む学会発表の件数については十分であるが、純学術的な論文がやや少ないように思われる。特許については、国内外合わせて12件の出願があり、構造特許が多く、十分な実績と言える。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

作られた立体構造に新規性が高く、ナノピンセット、ナノスプリング、バイオナノインジェクタなど、一般の関心を高めそうなナノ構造体の作製に成功した。テレビ放映、一般紙や一般科学雑誌掲載などを通して世間の耳目を多めに集めたという点で科学技術の一般理解増進に大きな貢献をしたことが評価される。

さらに微細化、物性発見・解明などの研究を緻密に進めていけば、FIB-CVD三次元ナノ構造の応用については大きな展開が期待できる。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

・NHK総合など3回のテレビ放映、朝日新聞など5件の一般紙への掲載、NEWTONなど3件の一般科学雑誌への掲載などを通じて、「ナノテクノロジー」を一般の人にも身近に感じさせたことは特筆に値する。

・平成19年度のJST「さきがけ研究」採択につなげた。

筑波大 藤田淳一 准教授 「超先鋭プローブによる局在场制御と新材料創製」

・バイオナノインジェクタ、ナノマニピレータに関して、2社と共同研究を実施しており、本技術の実用化にも努力している。

・三次元構造の自在な製作の面では優れているが、微細化の程度は必ずしも十分とはいえないので、さらにナノテクの本質(ナノ構造ゆえに発現する新物性の解明と機能化)に迫る研究に期待したい。

・受賞

第7回ロレアル色の化学と芸術賞金賞「モルフォ蝶ブルーの原理解明」など、国内外で4件受賞