

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名：LSI用3次元カーボン・アクティブ配線の開発

### 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

二瓶 瑞久 (富士通(株) 法務・知的財産権本部情報部先端技術研究室 室長付)

主たる共同研究者

高桑 雄二 (東北大学 多元物質科学研究所 准教授)

池永 英司 ((財)高輝度光科学研究センター 研究員)

### 3. 研究実施概要

本研究課題では、配線抵抗の増大や大電流密度による信頼性劣化といったLSI配線の課題を解決するために、多層グラフェンを用いた微細配線技術、更には配線部にトランジスタやメモリ等を配置したアクティブ配線技術の開発を行うことにある。カーボンナノチューブ(CNT)やグラフェンに代表されるナノカーボン材料は、電気伝導特性や熱伝導特性に優れていることに加え、アクティブ素子としての機能も期待される次世代エレクトロニクス材料である。本研究により、現在用いられている銅配線に替わる高性能配線としての可能性を示すと共に、新しい付加価値を有する3次元カーボン・アクティブ配線の可能性を示すことを目標とした。本研究チームは、グラフェン成長、グラフェン配線・デバイス及びグラフェン評価の3つのグループから構成し、研究開発を推進した。

グラフェン成長技術に関して、従来の化学気相成長(CVD)では、触媒金属薄膜上にグラフェンを析出させる方法が一般的であった。しかし、LSI配線においては、その触媒薄膜が特性劣化を引き起こす懸念があり、触媒金属を用いない成長が望まれていた。そのため、本研究課題においては、オリジナルな手法である光電子制御プラズマCVD法に取り組み、触媒金属を用いずで絶縁膜基板表面にナノグラファイト薄膜(多層グラフェンのナノ粒子が互いに複雑にネットワークした膜)を形成できた。光電子が放出しやすい基板材料上、あるいは、装置形状の工夫によって、良質なグラフェン構造が成長できることが分かった。

一方、デバイスへの適用可能性については触媒金属Cuを用いた熱CVD法グラフェン膜を配線層間絶縁膜上へ転写し、バックゲート型トランジスタを試作し、グラフェンに特有な両極性トランジスタ動作を確認した。

当初5.5年の研究期間で予定された本研究課題は、最先端研究開発支援プログラム(FIRSTプログラム)の「グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発」(中心研究者:横山直樹)の中でさらに成果を発展させることとなったため、研究開始から2.5年で終了することになった。したがって、当初構想された全体研究計画書における2.5年経過時点の進捗結果と、それまでに得られた研究成果について評価した。

### 4. 事後評価結果

#### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

グラフェン膜の製法として、Fe触媒を用いる熱CVD法、触媒金属を用いない光電子制御プラズマCVD法に関しては当初計画のマイルストーン通りに検討し、さらにCu薄膜に製膜したグラフェンを剥離転写する方法を追加検討した。

Fe触媒を用いる熱CVD法に関しては、グラフェンのグレインサイズは大きくなるものの、700℃以上の高温が必要となり、配線形成には適していないと早期に判断したことは妥当である。光電子制御プラズマCVD法では400℃以下の温度で、SiO<sub>2</sub>/Si基板上にカーボン・グラファイト膜の成長できることを明らかにしたことはオリジナリティが高い。ただ、そのメカニズムとして、SiO<sub>2</sub>/Si界面から励起された光電子がプラズマを誘起しグラフェンを成長させるというモデルに関しては更なる検証が必要である。追加で行った転写グラフェンを用いるトランジスタ製造方法はアクティブ配線としての可能性を示したが、コンタクト形成などの課題があり、グラフェンに期待される特性を得るには至っていない。

研究成果の量的評価としては、原著論文4件を始め、国際会議の口頭発表5件、知財として国内特許2件の件数はやや物足りない。はじめに製膜装置の立上げや製膜条件の詰めに手間取ったためであるが、本研究課題が移行した **FIRST** プログラムにおいて発展的な研究成果が得られることを期待したい。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

2. 5年という短い研究期間のなかでは、グラフェン材料の膜成長、膜の物性評価、配線プロセスの開発と電気的特性に関する基本的なデータの取得が主に行われたため、現段階では実用化への道筋や戦略目標への貢献度について現状では判断しにくい。しかしながら、グラフェンを次世代デバイス材料として利用する研究が世界の潮流となっており、今後、これまでに得られた基礎的なデータや知見をベースとして、イノベーティブなデバイス応用に貢献することを期待したい。

#### 4-3. 総合的評価

当初計画の半分に満たない2. 5年という短い期間で研究を終了した中で、オリジナルなグラフェンの低温製膜法や材料の電子状態・構造の物性に関する評価を着実に進め、初歩的ながらトランジスタ特性も調べられた。しかしながら、個別のデータ解釈においては、材料開発に必須の基礎学理的なアプローチがやや不足していたように思われる。転写グラフェン薄膜を用いたトランジスタプロセスも検討され、一応の電流・電圧特性も得られた点はマイルストーンが守られ、評価される。光電子制御プラズマの発生原理や有効性、膜成長反応メカニズムについてのユニークなモデルが提案されているが、もう少し精査が必要であると思われる。

以上の結果から、いろいろな興味深い実験データや現象、知見などが得られたことの意義は認められる。しかし、改良すべき課題も多く、現時点までの成果では当初構想のアクティブ配線の実現への道筋はまだ明確ではない。