

ナノカーボン配線

金属配線の微細化限界を超える 次世代配線材料を目指して

微細金属配線は先端LSIを構成するために不可欠です。しかし、LSIの高集積化による微細化の進展により、配線幅は既に10 nm台となっており、金属配線材料の伝導メカニズムが限界を迎えつつあります。一方、ナノカーボン材料は、その特異な伝導メカニズムから、配線幅や配線長に依存しない一定の抵抗となることが期待されています。東芝は、このたび、炭素(C)の2次元結晶であるグラフェンシートを数十層積層した多層グラフェン膜を、LSIの製造プロセスと整合性のとれるCVD (Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長) 法を用いてシリコン(Si) ウェーハ上に形成することに成功し、LSI配線への応用に向け最初の一步を踏み出しました。

金属配線の微細化限界

NAND型フラッシュメモリやロジックデバイスに代表されるSi LSIでは、デバイスの素子サイズと同程度の線幅を持つ微細金属配線と層間絶縁膜から成る多層配線構造が広く用いられています。

LSIの高集積化と高性能化を目指した素子サイズの微細化に伴い、配線の電気抵抗や寄生容量が増大するため、配線における伝送信号の遅延がデバイスの動作速度を制限してしまうという問題が発生します。また、配線抵抗による電圧降下はLSIの消費電力にも影響します。したがって、これら配線の電気特性の向上は先端LSIにおいて重要な課題の一つとなっており、一般に、抵抗率の低い銅(Cu)などの金属配線が

用いられてきました。

しかし近年、配線幅の縮小によりCu薄膜自体の抵抗率が増大してしまう、細線効果という現象が顕在化しています。これは、Cu中の伝導電子の格子散乱(フォノン散乱)で決まる平均自由長(約40 nm)よりも配線幅が小さくなってきたため、フォノン散乱する前に配線表面で非弾性散乱する伝導電子の割合が増大するからです。この結果、配線抵抗はその断面積の縮小以上に急増し、将来のフラッシュメモリに必要とされる10 nm幅以下の配線では、性能要求を満たせない懸念が出てきています。

そこで、配線幅や長さ依存した電子の散乱を受けずに進むことができる、バリスティック(弾道)伝導と呼ばれる特徴を備えたナノカーボン材料の応用が期待されています。

ナノカーボン材料の特徴

ナノカーボン材料は、C原子が六角形の格子を組んだ2次元結晶です。単層の平面状シートがグラフェンシート、これがロール状になったものがカーボンナノチューブ(CNT)と呼ばれます(図1)。

ナノカーボン材料では電荷の輸送がグラフェンシート面上の π 電子によることから、理想的には結晶格子に散乱されません。そのため、配線幅がnmサイズになると、Cu配線よりもグラフェン配線の抵抗が小さくなるのが理論的に予想されています。また、グラファイトブロックから剥離したグラフェンの抵抗測定結果から、線幅によらずほぼ一定の抵抗を示すことが報告されています。

東芝は、経済産業省及び独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機

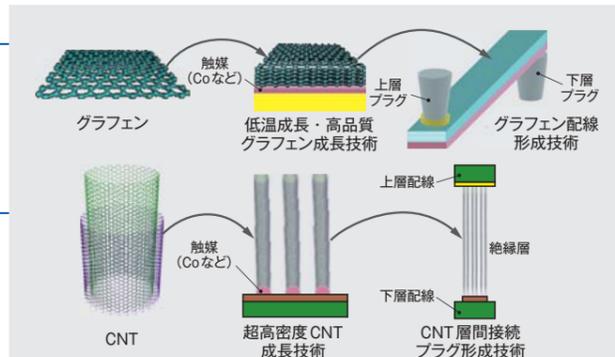


図1. ナノカーボン材料のLSI配線への応用 — シート状のグラフェンは、積層してLSI中の水平方向の微細配線に応用すること、また、円筒状のCNTは、配線層間を垂直方向に接続するプラグに応用することを目指しています。

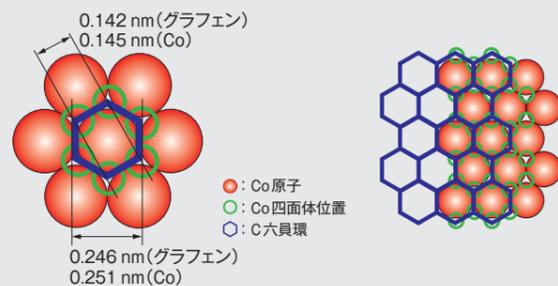


図2. 触媒薄膜とグラフェンとの結晶構造整合性 — 触媒であるCo(111)面の結晶構造は、Cの六員環から成るグラフェンの2次元結晶構造と高い結晶格子整合性を持つため、結晶性に優れたグラフェンの成長を促進します。

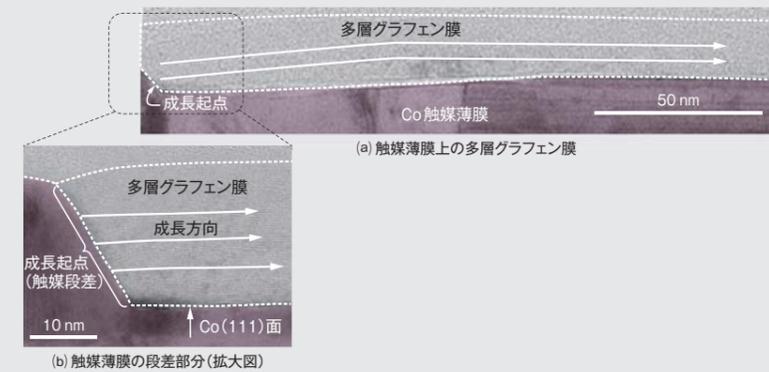


図3. 多層グラフェン膜の断面透過電子線像 — 多層グラフェン膜の形成を示す層状の構造がCo触媒薄膜の段差部から成長しています。

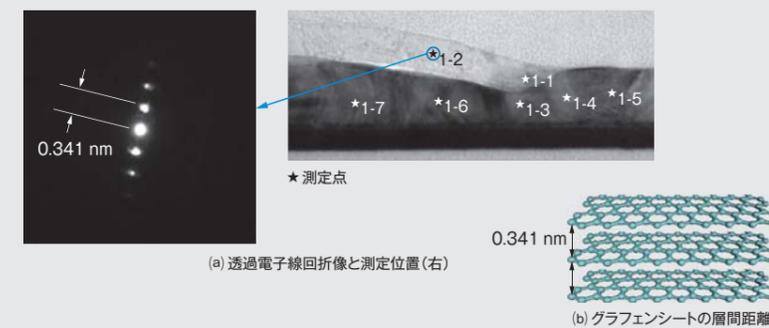


図4. 多層グラフェン膜の透過電子線回折像 — 電子線回折像から、グラフェンが触媒薄膜の垂直方向に層間距離0.341 nmで積層していることがわかります。

構による「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」の委託を受けた超低電圧デバイス技術研究組合の一員として、グラフェンを用いた先端LSI向け微細配線の実現に向け、研究を行っています。

CVD法によるグラフェンの成長

従来、グラフェンの電気抵抗を評価するためのサンプルは、グラファイトのブロックや1,000 °C以上の高温でCVD法により炭化ケイ素(SiC)基板上に成長させたグラフェンから、粘着テープにより1~数層のグラフェンを剥離し、これを別の基板上に転写し貼り付けることで作製しています。しかし、LSI用の配線材料として実用するには、従来の多層配線形成プロセスとの整合性を保ちながら、高品質の多層グラフェン膜を

直接Siウェーハ上に成膜し、これを任意の配線形状に加工する必要があります。

当社は、炭化水素を原料ガスとするプラズマCVD法により、600 °C以下の比較的低温で、結晶性に優れた多層グラフェン膜を成長させることに成功しました⁽¹⁾。ここでは、触媒層としてコバルト(Co)又はニッケル(Ni)の薄膜を使用しています。これはグラフェンの2次元結晶の周期構造と、面心立方格子構造であるこれら触媒金属の(111)面の周期構造の格子整合性が非常に高いことを利用して、触媒表面を(111)面にそろえること、及びCの成膜にプラズマアシストを用いたCVD法を採用することで、従来よりも低温でグラフェンを成長させることが可能になるためです。図2に示すCo(111)面とグラフェン六角形構造の関係から、結晶格子の不整合はわ

ずか1.8%と小さいことがわかります。また、このように600 °C以下におけるCVD法による成長では、グラフェンは触媒金属の段差部を成長起点として横方向に成長していくことが新たに判明しました(図3)⁽²⁾。成長するグラフェンの積層数は、触媒金属の段差の高さで一意に決まることも同時に見いだしています。このようにして成長させた多層グラフェン膜の結晶性を透過電子線回折法により評価したところ、グラフェンシートの積層間隔の周期性を示す明瞭な回折スポットが得られ(図4)、高い結晶性を持つ多層グラフェンが横方向に数百nmの領域にわたって形成できていることを確認できました。

今後の展望

触媒層による結晶性とグラフェン成長起点の制御を活用することで、今後は、300 mmのSiウェーハ上に高品質で大粒径の多層グラフェン膜を形成することを旨とするともに、LSIの配線への加工技術や配線層間の接続プラグである金属材料との電気的接合技術などの開発を行っていきます。

文献

- (1) 山崎雄一 他, "ナノカーボン配線応用に向けたグラフェン低温・高品質成長(1)", 第58回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 東京, 2011-03, 応用物理学会, (CD-ROM).
- (2) Wada, M. et al. A Crystallographic Relationship between Multi-layered Graphene and Catalytic Metal in Low Temperature Growth. Proceedings of MRS Fall Meeting 2011, Boston, 2011-11, Material Research Society, (CD-ROM).

梶田 明広

研究開発センター
デバイスプロセス開発センター研究主幹