

## カーボンナノチューブ／金属電極間の低抵抗オーミック接触界面構造の作製とその電子状態の解析

近藤 大雄<sup>1,2</sup>，二瓶 瑞久<sup>1,2</sup>，川端 章夫<sup>1,2</sup>，佐藤 信太郎<sup>1,2</sup>，\*栗野 祐二<sup>1,2</sup>

(株)富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター<sup>1</sup>，富士通(株)<sup>2</sup>

### はじめに

我々はカーボンナノチューブを次世代の配線材料候補と位置づけ、基板上での位置制御したナノチューブの成長及びナノチューブへのオーミック電極形成技術の開発を行っている。低抵抗性や高電流密度耐性などナノチューブの優れた電気的特性を引き出すためには、ナノチューブと金属電極間に低抵抗オーミック接触界面構造を形成することが重要である。これまでの研究から Ti 系の導電性界面層が存在すると低抵抗コンタクトが得られることがわかった[1]。しかし、接触界面構造と電子状態との相関などの詳細なメカニズムは十分に明らかになっていない。本研究では、多層カーボンナノチューブ／金属電極界面構造を微小角入射X線回折により、また、界面電子状態を硬X線光電子分光により測定・解析し、今後のオーミック接触界面構造設計の指針を得ることを目的とする。

### 実験

硬X線光電子分光は SPring-8 の BL47XU(課題番号 2005B0912)において行った。用いた光のエネルギーは 8keV、分光器には SES R-4000 を用いた。また、光電子の射出角は基板表面垂直方向から 10 度である。微小角入射X線回折は BL13XU(課題番号 2005B0859)において行い、回折装置としては ATX-GSOR を用いた。入射角は 0.147°、入射光エネルギーは 11keV である。多層カーボンナノチューブは化学気相成長法により成長し、触媒金属としてコバルト、電極金属としてチタンの 2 層構造を用いた。コバルトとチタンの膜厚はそれぞれ 2.5nm、6nm である。なお、同じ膜構造を用いて成長したカーボンナノチューブ束による配線ビア(図 1 に示すような多層配線間の縦方向接続)を試作し、従来のタングステンビアに匹敵する電気抵抗を得ている[2]。

### 実験結果

図 2 はカーボン(C)1s 内殻準位光電子スペクトルである。図には、(a)ナノチューブを成長した Co 2.5nm/Ti 6nm の基板に加え、接触界面が高抵抗になる (b)試料 (Co 1nm/Ti 2nm)も比較のため示している。両試料の膜厚条件ともに同じ成長条件で多層カーボンナノチューブ(multi-walled carbon nanotubes; MWNTs)が成長する。図 2 に示したように、両試料とも多層カーボンナノチューブ由来の光電子ピークを観測した。また、Co 2.5nm/Ti 6nm の試料では低束縛エネルギー側にナノチューブとは異なるチタンカーバイド(TiC)由来の光電子ピークを観測した。図には示していないが、チタン(Ti) 2p 内殻準位光電子スペクトルから、Co 1nm/Ti 2nm の試料ではチタン酸化膜(TiO<sub>x</sub>)のみが検出されたのに対し、Co

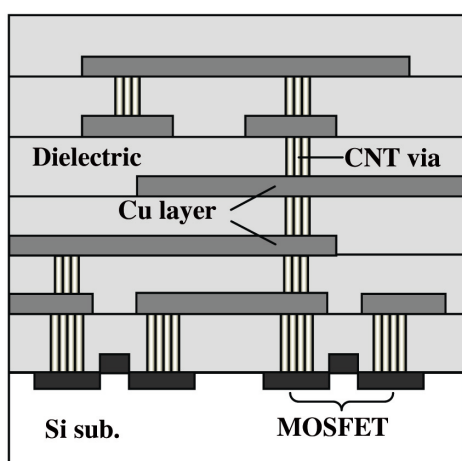


図 1 ナノチューブビア(CNT via)を適用した多層配線の模式図[1]

2.5nm/Ti 6nm ではチタン酸化膜に加え TiC 由来の光電子ピークを観測した。これまで導電性を有する TiC の存在により低抵抗のコンタクトが得られることが明らかにされていることから[1]、Co 2.5nm/Ti 6nm の試料においても同様にナノチューブと金属電極の界面部分に低抵抗のオーミックコンタクトが形成されていることがわかった。一方、Co 1nm/Ti 2nm の試料の場合では C1s 内殻準位スペクトルにおいて TiC 由来の光電子ピークが観測されず、さらに Ti 2p 内殻準位スペクトルにおいては  $TiO_x$  由来の光電子ピークのみが観測された。これらの結果は、チタン膜厚が十分でない場合(2nm 以下)にはカーボンナノチューブ成長中にチタン膜が全て酸化することによりカーバイド化を妨げたことを示唆している。

さらに、図 3 には同様の試料を微小入射角X線回折で測定した結果を示す。両試料共に、多層カーボンナノチューブ (MWNTs)及びチタン酸化膜由来の回折パターンを得、その角度からナノチューブ成長後に形成されたチタン酸化膜の構造がルチル型の  $TiO_2$  であることがわかった。また、光電子分光で検出したチタンカーバイドについては、その回折パターンの多くが  $TiO_2$  や他の回折パターンと重なるためにその構造については明らかではないが、Co 2.5nm/Ti 6nm の試料においてのみ観測された回折ピークと硬X線光電子分光の結果から、チタンカーバイドが形成されていることがわかった。

## まとめ

以上のように、硬X線光電子分光と微小入射角X線回折の実験結果の解析から、低抵抗なオーミック接触が得られる Co 2.5nm/Ti 6nm の試料において多層カーボンナノチューブとチタン電極間の界面にチタンカーバイドが形成されていることが明らかとなった。また、接触界面が高抵抗になる膜厚が2nmの場合には、下地電極であるTiがルチル型の  $TiO_2$  となっておりチタンカーバイドが形成されていないことがわかった。これらの結果は低抵抗なオーミック接触を実現するためにはチタンカーバイド形成が必要であり、そのためには一定以上厚さの膜厚のTiが必要となることを示唆している。

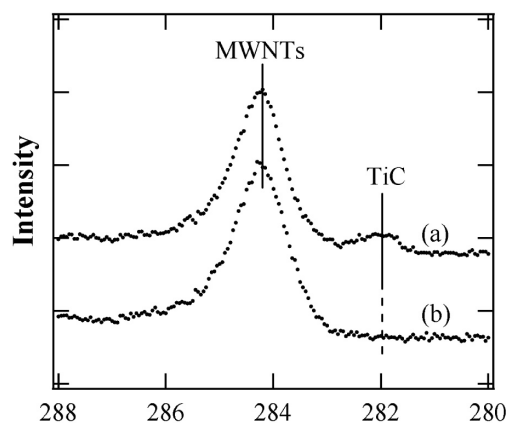


図 2 C1s 内殻準位光電子スペクトル

(a) Co 2.5nm/Ti 6nm、(b) Co 1nm/Ti 2nm。

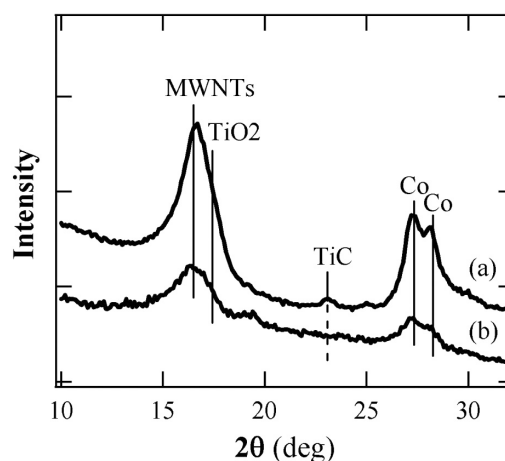


図 3 微小角入射X線回折パターン

(a) Co 2.5nm/Ti 6nm、(b) Co 1nm/Ti 2nm。

## 関連論文

- [1] M. Nihei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 1856.
- [2] M. Nihei *et al.*, IITC2005.

## 謝辞

日頃よりご指導頂く、富士通研究所ナノテク研究センターの横山フェローに感謝致します。また、JASRI の古宮氏、小林氏、池永氏、小畠氏、金氏、上田氏(以上、BL47XU)、坂田氏、北野氏(以上、BL13XU)には実験に関するご指導及びご助言を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。