

無電解金メッキ法により作製された 金ナノギャップ電極を用いた分子トランジスタの創成

Molecular Transistor Fabricated by Electroless Gold Plated Nanogap Electrodes

H24助自02

代表研究者 東 康 男 東京工業大学 応用セラミックス研究所 助教
Yasuo Azuma Assistant Professor, Materials and Structures Laboratory,
Tokyo Institute of Technology

Molecular devices have attracted much attention because of their unique property such as switching and memory phenomena. In order to realize molecular devices, the devices have to be solid-state devices, that is all electrodes and molecule are included in single substrate. We have established a fabrication process of nanogap electrodes with a few nm gap separation using a combination of top-down and bottom-up methods. In this study, we fabricate a molecular device consisting of [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) and electroless plated Au nanogap electrodes and observe an electrical characteristics in this device.

Au nanogap electrodes were fabricated by using electron beam lithography (EBL) and lift-off processes. electroless gold plating. PCBM molecules were introduced between nanogap electrodes by an immersion into the PCBM solution in toluene. The electrical measurements were carried out in vacuum.

In current-voltage (I-V) characteristics, current via the PCBM molecule introduced in Au nanogap electrodes increased with increasing temperature. This result means that in low temperature region less than $T=150$ K, an electron transport mechanism was described by tunneling phenomena, on the contrary, in high temperature region more than $T=150$ K, hopping mechanism mainly contributes to electron transport.

Also, in I-V characteristics at low temperature region, suppression of tunneling current was observed, which was derived from Coulomb blockade phenomena. This I-V characteristic was in good agreement with theoretical curve calculated from orthodox theory.

In spite of an application of gate voltage, gate modulation phenomena were not observed. This was caused by screening effect of electric flux between the gate electrode to PCBM molecule. In order to realize PCBM molecular transistors, appropriate electrode structures such as top-gate electrode structure are required.

研究目的

国際半導体技術ロードマップ (ITRS) の2011年版において“Molecular Memory (分子メモリ)”はEmerging Research Device (新素子探求)

の章の中で取り上げられており、その最大の長所は分子を用いることによって素子の微細化・高集積化が可能であるとの記述がされている。また分子はその構造あるいは分子配向の制御によって独自の機能性を持たせることがで

きるため、分子の特徴を生かすことを目指した分子デバイスは、新規デバイスを実現できる可能性が高い。

一方ITRS 2011年版では、“Molecular Memory”を実現する上で克服しなくてはならない課題として、分子そのものの電気特性を正確に測定し起こっている物理現象を把握することが取り上げられており、そのためには安定して再現性のある分子-電極間のコンタクトを実現することが必要であるとの記述がある。これまでの報告においては、単一あるいは少数の分子の電気特性を測定する手法としては、走査型プローブ顕微鏡の1つである走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) を用いることで分子像を測定し、その分子に対して電流-電圧特性を測定する手法が多く用いられている。しかしSTMは金属探針/分子/導電性基板構造以外の外部装置として、ピエゾ素子やモーター等の駆動機構が必要であるため、これをそのまま固体基板上に構成して電子デバイスとして用いることは困難である。

実デバイス化を考慮に入れて固体基板上で分子の電気特性の測定を行う手法を考える場合、2つの電極間のギャップ長を分子の大きさ程度としたナノギャップ電極を作製し、この間に分子を導入する手法がある。そこで申請者が所属する真島研究室で確立された無電解金メッキ法による金ナノギャップ電極の作製技術を元にして、ナノギャップ間に分子を導入することでその電気特性の測定を行うことを目的とする。

概 要

国際半導体技術ロードマップ (ITRS) の2011年版において“Molecular Memory (分子メモリ)”はEmerging Research Device (新素子探求)の章の中で取り上げられており、その最大の

長所は分子を用いることによって素子の微細化・高集積化が可能であるとの記述がされている。また分子はその構造あるいは分子配向の制御によって独自の機能性を持たせることができるため、分子の特徴を生かすことを目指した分子デバイスは、新規デバイスを実現できる可能性が高い。

一方ITRS 2011年版では、“Molecular Memory”を実現する上で克服しなくてはならない課題として、分子そのものの電気特性を正確に測定し起こっている物理現象を把握することが取り上げられており、そのためには安定して再現性のある分子-電極間のコンタクトを実現することが必要であるとの記述がある。これまでの報告においては、単一あるいは少数の分子の電気特性を測定する手法としては、走査型プローブ顕微鏡の1つである走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) を用いることで分子像を測定し、その分子に対して電流-電圧特性を測定する手法が多く用いられている。しかしSTMは金属探針/分子/導電性基板構造以外の外部装置として、ピエゾ素子やモーター等の駆動機構が必要であるため、これをそのまま固体基板上に構成して電子デバイスとして用いることは困難である。実デバイス化を考慮に入れて固体基板上で分子の電気特性の測定を行う手法を考える場合、2つの電極間のギャップ長を分子の大きさ程度としたナノギャップ電極を作製し、この間に分子を導入する手法がある。そこで申請者が所属する真島研究室で確立された無電解金メッキ法による金ナノギャップ電極の作製技術を元にして、ナノギャップ電極間に分子を導入することでその電気特性の測定を行うことを目的としている。

分子デバイスのプラットフォームとなる金ナノギャップ電極は次のようにして作製するこ

とができる。電子線描画装置を用いることで、ギャップ長25 nmの初期金ナノギャップ電極を作製する。次に金箔、ヨードチンキ、L (+)-アスコルビン酸から構成されるメッキ液を作製し、このメッキ液に初期金ナノギャップ電極を浸漬させることでギャップ部分をメッキし、ギャップ長5 nm以下の金ナノギャップ電極を作製する。このメッキの特徴として、メッキの進行に伴いギャップ部分が狭まることにより、メッキ液中に溶解している金錯体がギャップ部分に供給される速度が低下するので、結果としてギャップ部分におけるメッキの進行速度が低下するという自己停止機能を利用している。この自己停止機能を用いることで、同様のギャップ長を持った金ナノギャップ電極を量産することが可能となっている。さらにこの手法では上下に存在するゲート電極をナノギャップに近づけることが可能となっている。

今回は上記の無電解金メッキの手法によりギャップ長2.5 nmの金ナノギャップ電極を作製し、この金ナノギャップ電極を、フラレン誘導体である [6,6]-Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester (PCBM) のトルエン溶液に浸漬させることで、金ナノギャップ電極間にPCBM分子を導入させることで、PCBMを含む分子デバイスの作製を行った。

このようにして作製した分子デバイスの電流-電圧特性を温度 $T=9\text{--}300\text{ K}$ の範囲で測定したところ、温度の上昇に伴い電流が増加する傾向が見られた。この温度特性を詳細に見てみると $T<150\text{ K}$ の領域においては電流の増加はほぼ見られないのに対し、 $T>150\text{ K}$ においては電流の急激な増加が見られ、温度の逆数に対して指数関数的な振る舞いをしていることが分かった。この結果からPCBMを介した電子輸送は $T<150\text{ K}$ ではトンネルが支配的であるのに対し、 $T>150\text{ K}$ では熱活性化型のホッピングと

思われる輸送機構に支配されていることが分かった。

$T=9\text{ K}$ における電流-電圧特性においてはクーロンブロッケード現象が観測されており、PCBMがクーロン島として作用していることが分かった。そこで金ナノギャップ電極の上下に配置されているゲート電極に電圧を印加し電流の変調現象の観察を試みたが、ゲート変調現象を観察することはできなかった。これは金ナノギャップ電極自体がゲート電極からの電束を遮蔽してしまい、金ナノギャップ電極間に配置されたPCBMの電位を変調させることができなかったためであると考えられる。このような課題を解決するために、ゲート変調がかりやすいトップゲート電極構造の導入などがPCBMを用いた分子トランジスタの実現には必要になると考えられる。

－以下割愛－