

分子を量子ドットに用いた縦型トランジスタ

早川 竜馬 〈物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 HAYAKAWA.Ryoma@nims.go.jp〉

Tuhin Shuvra Basu 〈物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点〉

若山 裕 〈物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 WAKAYAMA.Yutaka@nims.go.jp〉

単分子を集積回路の構成要素とする分子デバイスのアイデアは、1974年に Aviram と Ratner による分子ダイオードの提案に始まる。その後、単分子接合を効率的かつ再現性よく形成する技術が確立され、単分子トランジスタや単分子メモリなど興味深いデバイス提案がなされてきた。しかしながら、50年近く経った現在でも、未だ実用化には程遠いのが現状である。分子の持つ“優れた量子機能”を如何に実用デバイスの中で発現するかが重要な鍵となる。

一方で現在のエレクトロニクスを支えるシリコンデバイスも大きな転換点を迎えている。素子の微細化によるトランジスタの高性能化は限界を迎え、従来とは異なる新しい動作原理で駆動するトランジスタの開発が求められている。そのため、ソース電極からドレイン電極へ流れる電荷の流れをトンネル効果により制御するトンネルトランジスタは、高速動作、低消費電力を兼ね備えた次世代トランジスタとして期待されている。しかしながら、“0”と“1”の2値動作という点では従来のトランジスタと変わらない。

上記背景から、筆者らは現在のシリコンプロセスに適合した分子トランジスタを開発するため、分子を量子ドットに用いた縦型トランジスタを提案している。分子は、原子レベルで厳密に規定された均一な粒子であり、サイズ分布の無い理想的な量子ドットとして機能する。分子の持つ離散準位（分子軌道）を利用した単電子トンネル伝導を誘起できれば、低消費電力化に加え、多値化が実現でき、トランジスタのさらなる高性能化が期待できる。これまで、トランジスタの基本構造である金属-絶縁体-

半導体構造の絶縁膜に C_{60} 分子を始め様々な分子を集積し、2重トンネル接合として機能することを示してきた。本研究では、上記トンネル素子をさらに縦型トランジスタのチャンネル層に応用し、分子軌道を反映したトンネルトランジスタ動作を実証したので報告する。

C_{60} 分子は3重縮退した最低空軌道と5重縮退した最高被占軌道を持つ。そのため、単一電荷が縮退した分子軌道へ注入されると帯電エネルギーにより縮退準位がシフトし、異なる準位として観測される。実際、20 K において測定したドレイン電流-ドレイン電圧特性において、縮退した分子軌道が等間隔に観測され、単電子トンネル伝導を確認した。オーソドックス理論を用いたシミュレーションから導出したトンネル接合容量を用い、量子ドット径を算出したところ1.3~1.9 nm となった。これは、 C_{60} 分子1~2個分に相当する。チャンネル層には 10^4 ~ 10^5 個の分子が存在しているが、各分子が孤立分散しているため、少数分子に起因するトンネル伝導を観測できる。また、300 K においても上記伝導機構が維持されており、室温動作も視野に入る。さらに僅か5 nm のチャンネル長であるにもかかわらず、4桁にわたるドレイン電流のゲート変調に成功した。これは、分子軌道の変調効果に加え、シリコン基板内に形成される空乏層によりドレイン電流が効果的に制御された結果で、分子をシリコンデバイスに集積する一つの利点と言える。今後、様々な機能性分子を用い、無機材料では実現できない“分子固有の機能”を兼ね備えた次世代トランジスタが実現できると期待される。

用語解説

単電子トンネル伝導：

量子ドットの持つ帯電エネルギーにより、電極間を流れる電流がクーロン反発により単一電荷レベルで制御される伝導。

金属-絶縁体-半導体構造：

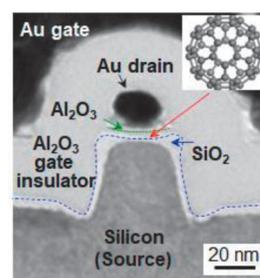
シリコントランジスタの基本構造。本提案素子では、高濃度ドーブリコン基板を用い、絶縁膜の厚さを電荷がトンネル伝導できる程度まで薄くすることにより、2重トンネル接合として利用している。

2重トンネル接合：

量子ドットを2つのトンネル障壁を介して電極に接合した構造。単電子トンネル電流や共鳴トンネル電流を観測するための基本構造。

オーソドックス理論：

2重トンネル接合における単電子トンネル伝導を記述する基本理論。量子ドットを流れる電流-電圧特性のシミュレーションに広く使用されている。



分子を用いた縦型トランジスタの断面透過電子顕微鏡像。