

世界初！ダイヤモンド・ナノマシンスイッチの開発に成功

—ダイヤモンドの新しい機能性、ナノ/マイクロマシンへ向けて—

平成22年10月14日

独立行政法人物質・材料研究機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）センサ材料センター（センター長：羽田 肇）廖 梅勇主任研究員らは、ナノ/マイクロマシン技術¹⁾を用いた単結晶ダイヤモンドのナノ可動構造体(カンチレバーおよびブリッジ)の作製に成功するとともに、単結晶ダイヤモンドのナノマシンスイッチ²⁾の開発に世界で初めて成功した。
2. ナノマシンスイッチは、既存の半導体デバイスに比べて、高機能化、省エネルギー化を可能とする技術である。従来のナノ/マイクロマシンスイッチの多くは、シリコンや金属材料を用いて作製されているため、機械的、化学的および熱的な安定性が悪く、信頼性及び耐久性に劣る欠点がある。ダイヤモンドは、弾性定数、機械的硬度、熱伝導率、絶縁性など物質中で最高値を有する材料であり、高機能・高信頼性なナノマシンスイッチの実現が期待できる。しかしながら、単結晶ダイヤモンドの可動構造体の作製が難しく、単結晶ダイヤモンド・ナノ/マイクロマシン開発は難しい課題であった。
3. 当グループは、単結晶ダイヤモンド基板に高エネルギーイオンを注入することによって局所的にグラファイト犠牲層³⁾を形成した後、マイクロ波プラズマ気相成長法⁴⁾によって導電性を持つダイヤモンド薄膜を成長させ、その後グラファイト犠牲層を除去することによって、可動構造体を作製するプロセスを開発した。更にこの技術を発展させ、3つの電極より構成されるトランジスタ状構造からなるナノマシンスイッチデバイスを作製することに初めて成功した。
4. 開発されたダイヤモンド・ナノマシンスイッチのリーク電流はかなり低く、消費電力は10ピコワット(pW)以下である。また、表面固着がほとんど観測されず、高い再現性および高い信頼性を実現する。更に、ダイヤモンド・ナノマシンスイッチは高温環境(250°C)で安定に動作することも確認した。カンチレバー可動構造体のヤング率⁵⁾は1100GPaと測定され、ダイヤモンドバルク単結晶の値に近く、ギガヘルツの高速スイッチ操作を期待することができる。
5. ダイヤモンド・ナノマシンスイッチは、従来のナノ/マイクロマシンスイッチに比べ、信頼性、寿命、速度、出力などの機能の大幅な向上、また、次世代高周波無線通信および耐環境デバイスなどの分野での応用が期待される。更に、本研究成果は、ダイヤモンドの新しい機能性分野ナノ/マイクロマシンの基盤技術を確立するとともに、化学、物理、および機械的センサへの展開を開拓することができる。

研究の背景

これまで、半導体シリコン-CMOSを用いた集積回路は、ムーアの法則⁶⁾に従って微細化を突き進んだが、デバイスサイズの最小寸法が22nmスケールを超えると物理的限界がある。例えば、CMOSが微細化するに従いリーク電流が増加する問題が生じ、開発が非常に困難になる。一方で、人類の排出するエネルギーが温暖化ガスを増加させ、地球環境を脅かしており、エレクトロニクス産業の世界的潮流は省エネルギーと環境重視に研究の軸足を移しつつある。ナノ/マイクロマシン技術は、More than Moore⁶⁾を実現すると期待される技術であり、省エネルギー化をもたらす21世紀の基盤技術である。

ナノマシンスイッチは、既存の半導体デバイスと比べて、高機能化、および省エネルギー化を可能とするデバイスである。例えば、無線LANや携帯電話に代表される無線通信分野のうち、既存の高周波半導体電界効果トランジスタやダイオードなどスイッチングデバイスは、スイッチオン状態での電力損失が比較的大きく、またスイッチオフ状態でのリーク電流を極力減少させ、更に耐電圧を向上させる必要がある。ナノ/マイクロマシンスイッチは、従来の半導体スイッチと比べてゼロリーク電流とすることが可能であり、消費電力や伝送損失が小さく、無線通信用部品の性能の大幅な向上と低コスト化が可能のため、将来のワイヤレス時代のキーテクノロジーに位置付けられる。従来のナノ/マイクロマシンスイッチの多くは、シリコンや金属材料で作製されているため、機械的、化学的および熱的な安定性が悪く、信頼性および耐久性に劣り、スイッチング速度が遅い等の欠点があった。

ダイヤモンドは、弾性定数、機械的硬度、熱伝導率、絶縁性など物質中で最高値を有する材料であり、高濃度不純物ドーピングすると金属導電性になるため、既存の材料をはるかに凌ぐものであり、高機能・高信頼性ナノマシンスイッチの実現が期待できる。しかしながら、単結晶ダイヤモンドの可動構造体を作製するプロセスが難しく、デバイスの概念もなかったため、単結晶ダイヤモンドのナノ/マイクロマシン開発は難しい課題であった。

研究成果の内容

ダイヤモンドは、化学薬品に対し不溶不融であり加工が難しく、単結晶ダイヤモンドのナノ/マイクロマシンデバイスを作製することは困難であった。今回、単結晶ダイヤモンド基板にダイヤモンド薄膜を成長させたダイヤモンド-オン-ダイヤモンドを基本概念として、ナノ/マイクロマシンの根幹部分であるナノ可動構造体の作製に成功するとともに、単結晶ダイヤモンドのナノマシンスイッチの開発に世界で初めて成功した。

本研究では、単結晶ダイヤモンド基板に高エネルギーイオン（カーボン、180keV）を注入する（注入量 10^{16}cm^{-2} ）ことによって、局所的にダイヤモンドをグラファイトに相変態させた犠牲層（グラファイト犠牲層と呼ぶ）を形成した後、マイクロ波プラズマ気相成長法によってボロンをドーピング（濃度 10^{18}cm^{-3} ）した導電性を持つダイヤモンド薄膜を成長させ、その後グラファイト犠牲層を溶液エッチング除去することによって、可動構造体（一端が固定され他端が自由なカンチレバー、または両端を固定したブリッジ）を作製するプロセスを開発した。更にこの技術を発展させ、3端子トランジスタ状構造からなる横方向ゲート電界によるスイッチ操作方式のナノマシンスイッチデバイスを作製した。図1に、単結晶ダイヤモンドの可動構造体[(a)カンチレバーおよび(b)ブリッジ]、および(c)3端子ナノマシンスイッチの走査型電子顕微鏡写真を示す。図の基板側には、エアギャップ（300nmの空隙）構造が形成されていることが確認でき

る。スイッチの動作原理は、ソースドレイン間電圧を印加して、ソースゲート間にプルイン電圧⁵⁾以上の電圧を印加すると、ゲート-カンチレバー可動構造体にエアギャップを介して静電気引力が働き、カンチレバー端がドレインに接触することによって、電流のオン/オフ操作を行うことである。図2に、単結晶ダイヤモンドのカンチレバーを用いた3端子ナノマシンスイッチのドレイン電流とゲート電圧特性の電圧印加繰り返しに対するスイッチング特性を示す。プルイン電圧は70V、プリアウト電圧⁷⁾は60Vであり、走査回数に対しても安定していることがわかる。またリーク電流は1pA以下であり、優れた絶縁性を持っている。更に、消費電力は10pW以下であった。

ナノ/マイクロマシンで問題となる表面固着はほとんど観測されず、高い再現性および高い信頼性を実現する。これは、ダイヤモンドの材料の特徴を反映しているものと考えられる。更に、ダイヤモンド・ナノマシンスイッチは、高温環境(250°C)で安定に動作することも実証した。ダイヤモンドカンチレバー可動構造体のヤング率の測定値は1100GPaであり、将来的には、ギガヘルツレベルの高速スイッチ操作を実現することが期待される。

波及効果と今後の展開

ダイヤモンド・ナノマシンスイッチは、硬度・耐摩耗性・耐熱性など機械的特性に優れ、ヤング率が大きいこと高速なスイッチ動作が可能であることを示した。従って、従来のナノ/マイクロマシンスイッチに比べ、信頼性、寿命、速度、出力など機能を大幅に向上させることが期待される。無線LANや携帯電話に代表される次世代高周波無線通信分野、原子炉等の放射線環境下、宇宙空間、および高温過酷空間にて動作する耐環境デバイスなどの分野で応用を期待される。更に、ダイヤモンド・ナノマシンスイッチの動作周波数やドレイン電流は、カンチレバー表面への吸着分子種、圧力、および電磁力に対して敏感に応答するため、化学、物理、および機械的センサへの展開を期待することができる。

問い合わせ先：

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1
独立行政法人物質・材料研究機構
企画部 広報室 [TEL:029-859-2026](tel:029-859-2026) FAX:029-859-2017

研究内容に関すること：

独立行政法人 物質・材料研究機構
センサ材料センター 光学センシング材料グループ
主任研究員 廖 梅勇 (りょう めいよん) (*英語対応)
グループリーダー 小出 康夫 (こいで やすお) (*日本語対応)
TEL : 029-860-4311
FAX : 029-851-4005
E-Mail : Meiyong.Liao@nims.go.jp
Koide.Yasuo@nims.go.jp

用語解説

1) ナノ／マイクロマシン技術

マイクロマシン（MEMSとも呼ぶ[microelectromechanical system: MEMS]）は、機械要素部品、センサーアクチュエータ、電子回路を一つの半導体基板、ガラス基板、有機材料などの上に集積化したデバイスを指す。主要部分は立体形状や可動構造を形成するための犠牲層エッチングプロセスを含む。マイクロマシンよりも小さな機械的構造を作製できるようになり、ナノマシン（NEMSとも呼ぶ[nanoelectromechanical system: NEMS]）の実現が可能となった。

2) ナノマシンスイッチ

ナノ／マイクロマシン技術を利用した微小機械によるスイッチデバイス。微小なリレー装置に近い。様々な形状があり、そのほとんどが電磁気力を利用して、物理的に接点を切り替える動作原理である。

3) グラファイト犠牲層

ダイヤモンドは、高エネルギーイオンを注入することによって、熱力学的安定相であるグラファイト（カーボン）に相変態する。グラファイトは、溶液エッチングにより除去することができるため、グラファイトに相変態させた領域は、後工程において除去することができる。このためグラファイト犠牲層と呼んでいる。

4) マイクロ波プラズマ気相成長

マイクロ波（2.45GHz）を導波路を通して照射することによって、原料ガスをプラズマ状態にするプラズマ気相成長法である。これによって原料ガスの原子や分子は励起され、化学的に活性となる。様々な物質の薄膜を成長させる方法の一つである。

5) ヤング率

縦軸に応力、横軸に歪をとった応力歪曲線（S－Sカーブとも呼ぶ）の直線部の傾きに相当し、単位歪量に対する発生応力の大きさを表す。一般に、硬い材料程大きな値となる。

6) ムーアの法則

Mooreの法則（ムーアの法則）は、半導体チップに集積されるトランジスタの数が18～24ヵ月ごとに2倍に増えるという半導体チップの集積度の年次推移を表す規則性を言う。More than Moreは、そのスピードのスケーリングで微細化が進んでいるのと同時に、デジタル回路にいろいろな機能が盛り込まれるようになり、トランジスタ数の増加では表現できない質的な革新的要素技術を指す。

7) プルイン電圧、プルアウト電圧

プルイン電圧は、機械的なスイッチのソース電極とドレイン電極とが電氣的に導通（オン）するために必要なソース電極とゲート電極との間のしきい値電圧である。その逆に、電氣的に遮断する（オフ）しきい値電圧をプルアウト電圧と呼ぶ。

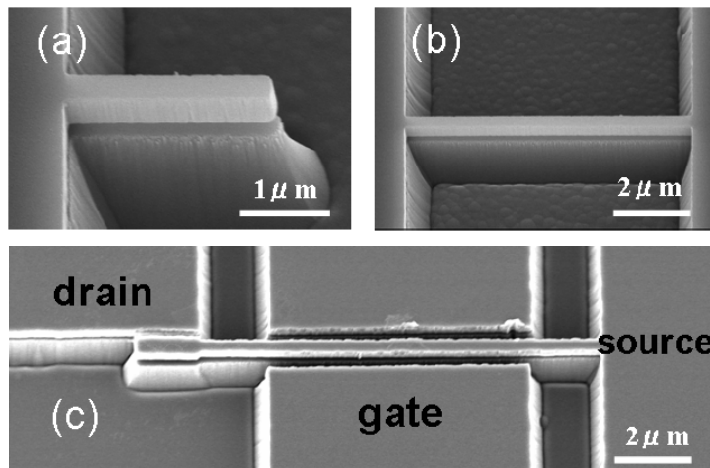


図1. 単結晶ダイヤモンドの可動構造体[(a)カンチレバーおよび(b)ブリッジ]、および(c) 3端子ナノマシンスイッチの走査型電子顕微鏡写真。基板側にはエアギャップ（空隙）構造が形成されている。

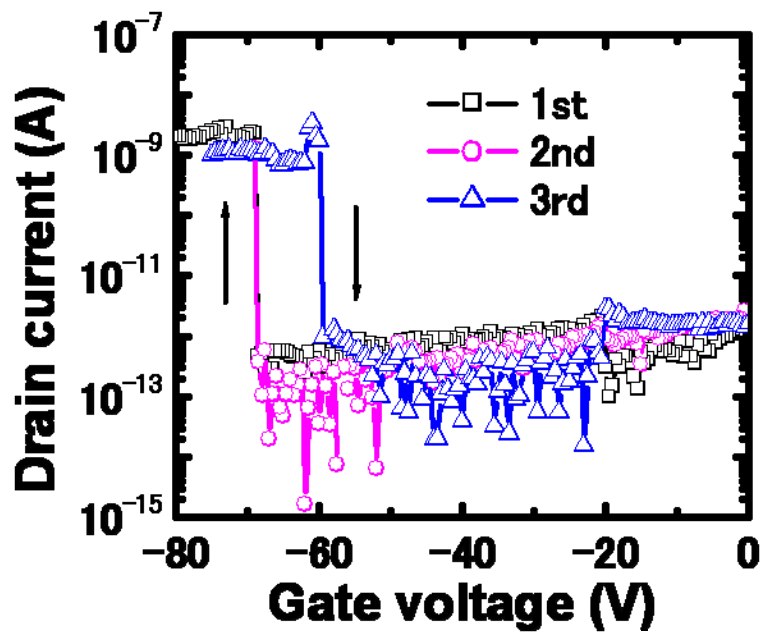


図2. 単結晶ダイヤモンドのカンチレバーを用いた3端子ナノマシンスイッチのドレイン電流とゲート電圧特性の電圧印加繰り返しに対するスイッチング特性。