

同時発表：

筑波研究学園都市記者会（資料配布）

文部科学記者会（資料配布）

科学記者会（資料配布）



地上でもっとも薄く伝導性の高い集積回路実現へ

原子膜グラフェンを用いたロジック素子

平成 22 年 6 月 23 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）は、地上に存在するもっとも薄く伝導性の高い薄膜（原子膜）であるグラフェンを用いて集積電子回路の基本要素を試作し、動作検証に成功した。
2. また、同回路の入力信号電圧に対する主力電圧の変化から得られる電圧ゲインは、従来のグラフェン素子研究によって報告されていた値(0.044 程度が最大)より、大きな向上(7、約 150 倍)に成功した。
3. 電子素子は微細化が進み、素子の最小加工寸法がいずれ 10 ナノメートル以下になると言われている。それと同時に、あまりに微細になると電流制御が従来の半導体材料では十分に満たすことができず、『微細化の限界』が議論されている。解決法のひとつとして、極薄の伝導チャネルを用いた電子素子が考えられており、その材料として、グラフェンの電気伝導が広く注目されていた。
4. 本研究での素子形状の特徴は、電気伝導を変調するためのゲート電極の部分に、独自開発のゲート絶縁膜自己形成法を用いてナノメートルスケールの極薄絶縁膜を用いたことである。これによって、電界を極めて効率よくグラフェンに電圧を加えることができ、素子のスイッチング特性を従来に比べて格段に向上させることに成功した。同時に、このグラフェン素子を直列に 1 枚グラフェンの中に形成することで、インバータ動作における大きな電圧振幅を検証することに成功した。
5. 従来、グラフェンはその基礎伝導性の高さに反して、ロジック素子としては課題が大きいと討論されていたが、この結果によりその問題が解決し、今後の研究発展への加速が期待できる。
6. これらの成果は、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)の塚越一仁主任研究者および黎 松林(そんぐりん り)研究員らが、筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻、神田晶申准教授とともに行った研究によって得られた。
7. 本研究は、6 月 2 日（現地時間）付けの米国科学誌 NanoLetters 電子版に公開された。

研究の背景

半導体集積回路における、主たる電気スイッチ素子のチャネル材料(電流が流れるスイッチング部分)はシリコン (Si) である。スイッチ素子の最小加工寸法を小さくすることで、スイッチング動作の高速化や回路サイズの縮小に伴うコスト低減を実現してきた。

しかし、現在ではスイッチ素子のサイズは20-30nmにまで達し、いずれ10nmもしくはそれ以下になると言われている。しかし、この微細化にともなう性能向上が次第に難しくなっている。そのため、シリコンに代わる化合物半導体などの探索が盛んに行われているが、その中で、シンプルな構造で、原料原子が無限に存在するグラフェンが注目されている。

グラフェンは、原子層が重なってできるグラファイトの一層分のことであり、六角形の網の目のように規則正しく炭素原子がシート状に並んでいる。

最近の研究結果により、グラフェンは極めて優れた電気特性を持ち、その電子の移動度は従来の半導体よりも遥かに大きいことが分かってきたため、次世代の高速素子への期待が高まってきている。さらに原子薄膜であることに起因する、従来素子では問題となりつつあったオフ電流リークの抑制を実現する可能性が期待されている。この魅力的な材料特性を引き出すためのロジック動作検証などへの展開が必要とされていた。

研究成果の内容

もともとNIMSでは、グラフェンの電気伝導基礎を解明して電気伝導を制御することを目指し、天然グラファイトから取り出した1枚のグラフェンに電極形成をおこない、その特性の評価をおこなっていた。

またその中で、アルミニウム薄膜をグラフェン上に直接形成して空気中に数時間放置するだけで、グラフェンの特性は低下しないまま、グラフェンとアルミニウムの間に絶縁膜が必ず形成することを見出していた。

今回は、この機構の解明と制御および応用を目指して、グラフェンの電気伝導の研究をさらに推し進めた。

グラフェン上にアルミニウム薄膜を直接形成すると、アルミニウム薄膜の内部は金属のまま、グラフェンとアルミニウムの間に数ナノメートルの酸化絶縁膜が自然に形成される。この酸化アルミニウム絶縁膜を介してグラフェンに電界を印加すると、低電圧(2V以下)でグラフェンの電気伝導を変調することができた。この変調機構は、グラフェンの電流スイッチング素子として機能することを示している。このナノスケール厚の自己形成の酸化アルミニウム絶縁膜によって、従来報告のグラフェン素子よりも格段に素子特性が向上した。

動作検証は、このグラフェン素子を、1枚のグラフェン上に隣接して形成し、連動して動作することで機能するロジック素子を作り行った。

するとこのロジック素子は、単体素子と同様に低電圧で駆動でき、入力電圧に対して出力電圧が変化するインバータ動作を確認し、十分な電圧振幅を示した。

しかも、入力信号電圧に対する主力電圧の変化から得られる電圧ゲインは最大で7に達し、従来のグラフェン素子研究によって報告されていた値(0.044程度が最大)より、非常に大きな向上(約150倍)を示した。

この結果によって、従来からグラフェンの基礎伝導性の高さに対する期待に反して、ロジック素子としては出力電圧に対して大きな入力電圧(=ゲート電圧)が必要であるという問題が解決し、今後の研究発展への加速が可能となる。

波及効果と今後

グラフェン素子の研究は、その特徴である極めて伝導性の高い原子膜厚のとしての特徴を引き出すことがカギであり、得られた知見や技術は現在のシリコンデバイスの次への新素材や材料利用の技術革新へと波及すると期待されている。

とりわけ、グラフェンは厚さ方向全体に渡って電界効果を及ぼすことができる理想的な 2 次元伝導体であるが、基本的に 3 次元の伝導体であるシリコンとは、全く伝導機構が異なる。この違いを活かした応用展開の探索によって、従来素子の発展とは起点の違う応用も可能である。そのため広く世界的に研究が進められており、今後様々な特性が見出されると思われる。これらの新規材料の特性をさらに取り込み、新材料としての特性を発展させていく予定だ。

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST) の研究領域「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」(研究総括:堀池靖浩, 独立行政法人物質・材料研究機構 名誉フェロー) における研究課題「ナノ界面・電子状態制御による高速動作有機トランジスタ」(研究代表者:塚越一仁) の一環として行われた。

問い合わせ先:

報道担当:

独立行政法人物質・材料研究機構

広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026

研究内容に関すること:

独立行政法人物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA)

研究員 黎 松林 (そんぐりん り)、主任研究者 塚越 一仁 (つかごし かずひと)

TEL: 029-860-4894

FAX: 029-860-4706

E-Mail: TSUKAGOSHI.Kazuhito@nims.go.jp

【用語解説】

1) グラファイト/グラフェン

炭素原子が 6 角形を規則正しく平面上に繰り返して形成するシートを基本層として、層間隔 0.34 ナノメー

トルで積み上がった材料がグラファイトである。軽くて強度の高い材料として、次世代航空機の部品などに使われている。また、鉛筆の芯の材料でもある。このグラファイト片を平坦な基板表面に押しつけると、上記シート層のグラフェンを取り出すことができる。このグラフェンは極めて高い電気伝導度を有する。

2) トランジスタ/集積回路

外部からの電圧信号に対して、電流値が変化することでスイッチ動作する素子。トランジスタを1つの基板上に密集して形成し、連携して機能する機能を示せるようにすることで集積回路を形成し、コンピュータなどとして動作させることができる。

3) インバータ

入力された電圧信号に連動して、回路からの電圧信号を反転させる集積回路を構成する基本要素。

4) 電圧ゲイン

入力した電圧信号に連動して変化した出力信号の変化の大きさを示す値。回路の上流で発生した信号の値を回路下流に伝えるためには、ゲインは1以上でなければ、信号が減衰して消滅してしまう。

【高効率ゲートの重要性】

我々の開発した高効率ゲート＝低電圧(1V程度)動作のゲートは論理回路の素子のためには重要である。論理回路は、ある段の出力信号が次の段の入力信号(＝ゲート電圧)となる。一方で、出力電圧はソースドレイン間の電圧によって制限される。したがって、ソースドレイン間の電圧と同程度のゲート電圧でトランジスタが動作しなくてはならない。従来、グラフェンでよく使われてきた基板ゲートでは、数十～100V程度のゲート電圧が必要であったが、このような電圧をソースドレイン間にかけることはできないため、論理回路として用いることは極めて難しい。

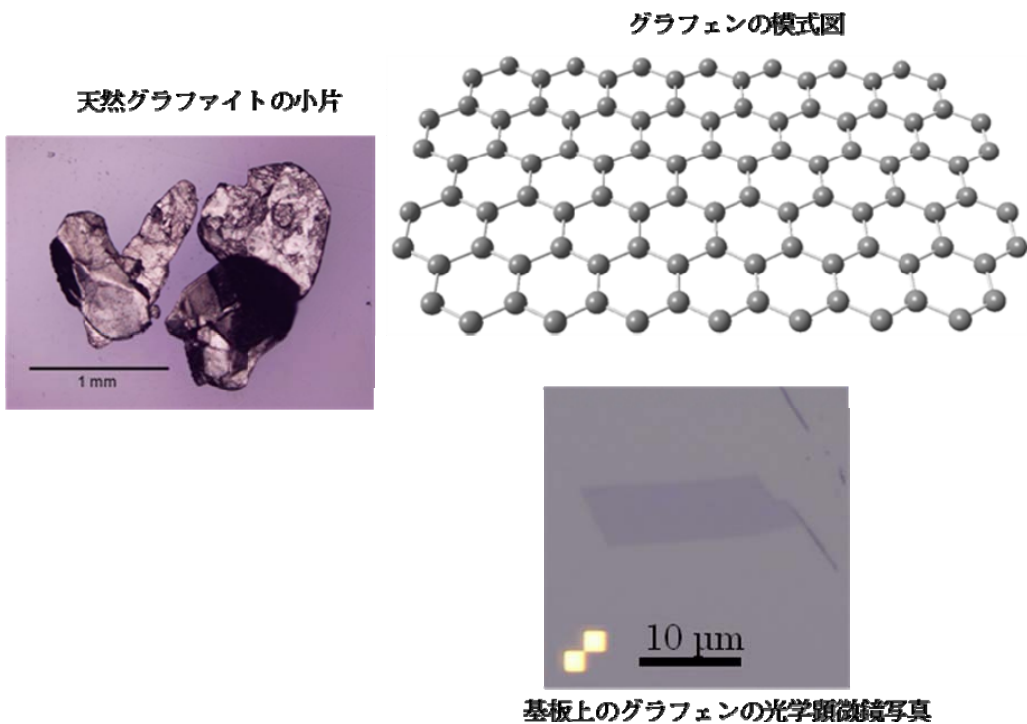


図 1 : (a)天然グラファイト(マダガスカル産)の小片。この小片塊を SiO_2/Si 基板上に押しつけて引き離すと、基板にグラフェンが残る。(b)長さ 10 ミクロン程度のグラフェン。

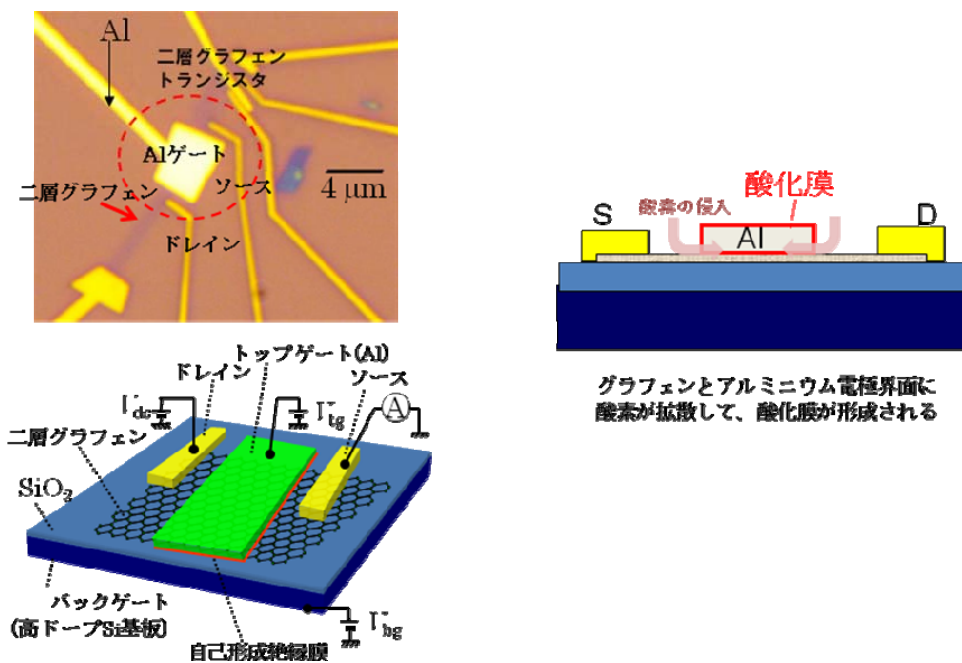
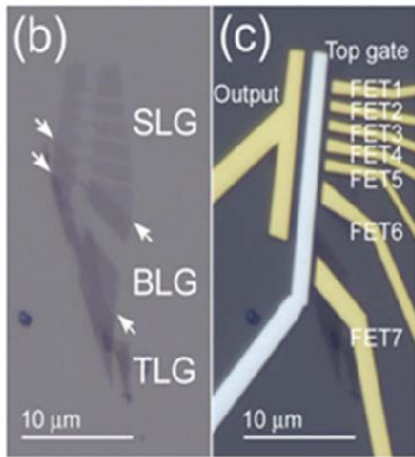
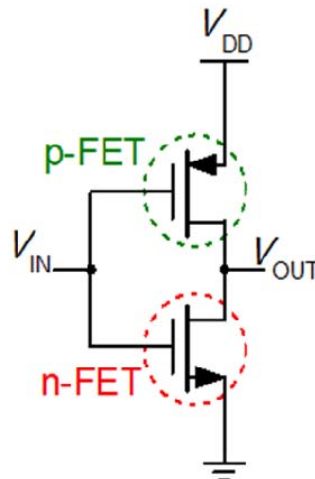


図 2 : グラフェン電界効果素子(FET)の例。基板上のグラフェンにソース・ドレイン電極を作製した後、アルミニウム電極を形成すると、アルミニウムとグラフェンの界面に酸素が侵入し自己形成酸化絶縁膜ができる。この酸化絶縁膜を介して電界効果をグラフェンの伝導に対して加えることができる。

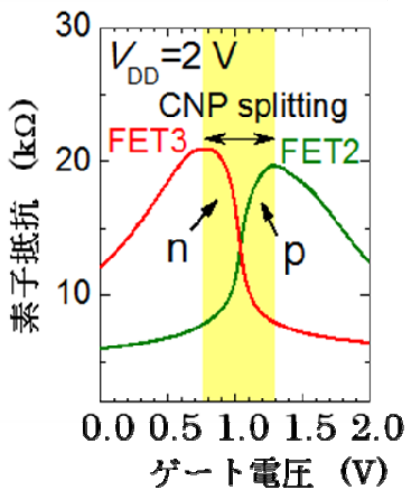


作製したグラフェン素子の光学顕微鏡写真
 (左)1枚のグラフェンを加工して形成したチャンネル。
 (右)ソースドレイン電極とゲート電極を形成した後の構造

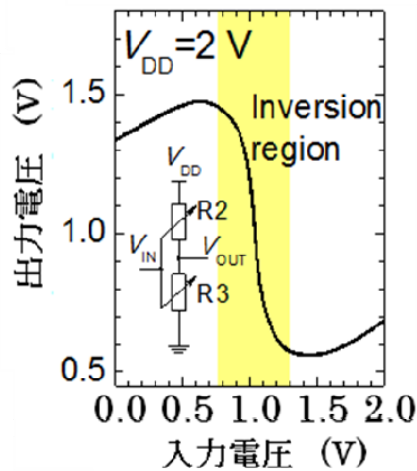


インバータ回路の等価回路図。
 2つのグラフェントランジスタがそれぞれp型とn型として動作する

図 3 : 試作したグラフェンインバータ素子の例(光学顕微鏡写真)。評価したインバータ構造の等価回路図。2つのグラフェンFET を連結して動作させることで、インバータ動作を得た。



2つのグラフェントランジスタのゲート電圧特性。それぞれp型とn型として動作。



2つのグラフェントランジスタのゲート電圧特性。それぞれp型とn型として動作。

図 4 : (左)2つの素子其々のゲート電圧特性。其々のp型とn型の動作範囲にソースドレイン電圧を印加して、p型とn型の組み合わせとして評価した。(右)得られたインバータ動作の例。入力信号に連動して主力信号が変化する。

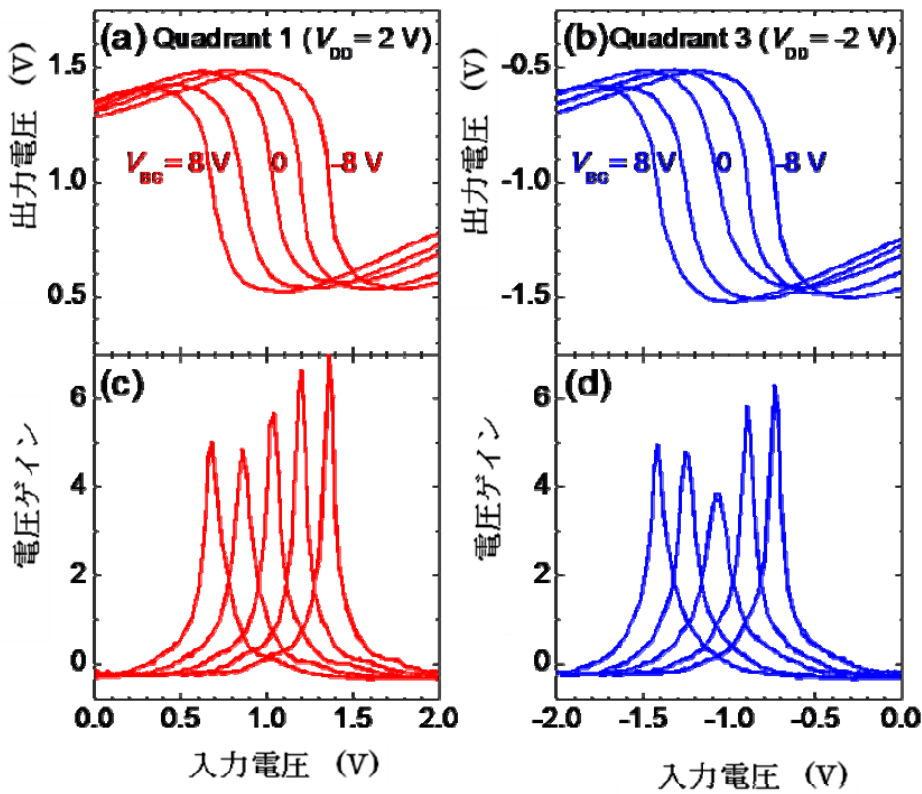
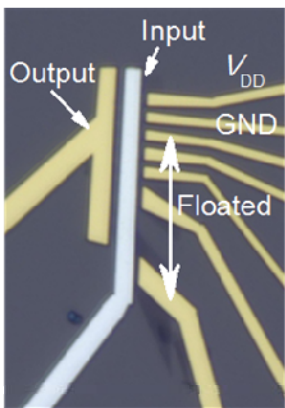
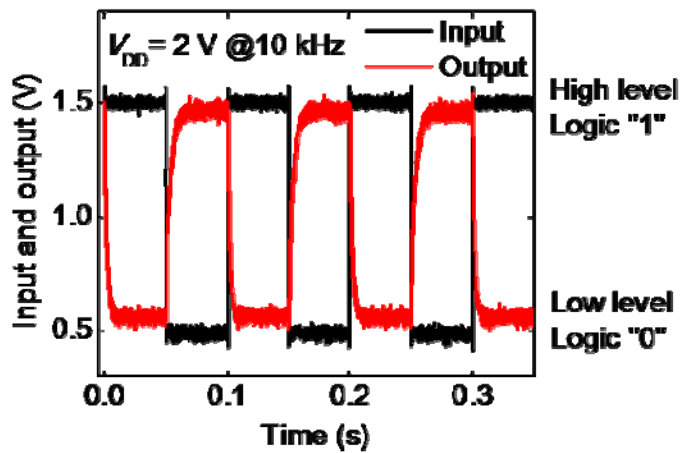


図5：グラフェンインバータの動作検証の詳細。4-7の電圧ゲインが常に得られている。



グラフェン素子の光学顕微鏡写真



入力信号に対する出力信号の応答

図6：交流入力に対する出力の変調。入力信号と連動して出力信号が高出力レベルと低出力レベルが連動して動作している。