

グラフェンの新しい伝導制御技術を開発

ー ヘリウムイオン照射で室温動作スイッチングトランジスタを実現 ー

平成 24 年 9 月 24 日

独立行政法人 産業技術総合研究所

独立行政法人 物質・材料研究機構

■ ポイント ■

- ・ グラフェンに低密度の人工結晶欠陥を導入し電気伝導の変調を実現
- ・ 欠陥導入されたグラフェントランジスタで初めて室温での電流のオン・オフ動作に成功
- ・ 将来の超低電圧動作 CMOS のチャンネル材料として期待

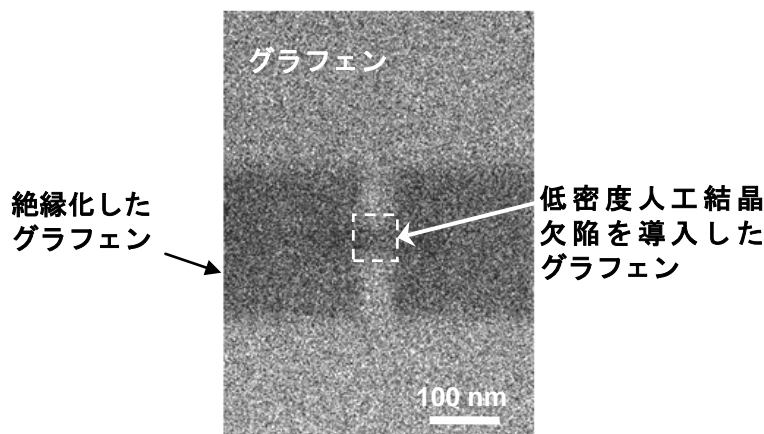
■ 概 要 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所【理事長 野間口 有】（以下「産総研」という）ナノエレクトロニクス研究部門【研究部門長 金丸 正剛】連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター【連携研究体長 横山 直樹】（以下「GNC」という）中払 周 特定集中研究専門員ら、ナノエレクトロニクス研究部門 小川 真一 招聘研究員、ナノデバイスセンター【センター長 秋永 広幸】らは、独立行政法人 物質・材料研究機構【理事長 潮田 資勝】（以下「物材機構」という）国際ナノアーキテクニクス研究拠点【拠点長 青野 正和】（以下「WPI-MANA」という）塚越 一仁 主任研究者らと共同でグラフェンの新しい電気伝導制御技術を開発した。

今回開発した技術は、グラフェンに対してヘリウムイオン顕微鏡を用いてヘリウムイオンビームを照射し、人為的に低密度の結晶欠陥を導入することによって、グラフェンの中の電子や正孔の動きをゲート電極に電圧を与えて変調可能にするものである。このような結晶欠陥の導入による伝導制御はこれまで理論的には予想されてきたが、実験的に室温でオン・オフ動作に至った例はなかった。今回開発した技術は、大面積ウェハにおいても既存の製造技術の枠内で導入が可能である。

なお、この技術の詳細は、2012 年 9 月 25～27 日に京都府京都市で開催される国際素子・材料コンファレンス (SSDM2012) で発表される。

_____ は【用語の説明】参照



試作されたグラフェン素子のヘリウムイオン顕微鏡像

■ 開発の社会的背景 ■

近年、携帯情報端末の爆発的な普及や、IT 機器の高機能化に伴う消費電力の増大が懸念され、電子情報機器の消費電力低減に関する社会的要求が高まっている。このような社会的要求から、大規模集積回路(LSI)の消費電力低減の試みは急速な進展を見せているが、従来のトランジスタ構造は、短チャネル効果やドーパント起因の特性ばらつきなどの本質的な限界があると指摘されている。一方、2004年に初めて単離されて以降急速な注目を集めたグラフェンは、電子の動きやすさを表す電子移動度がシリコンの100倍以上もあり、シリコンなどで本質的な問題となっている短チャネル効果への耐性もある。さらには、従来の半導体におけるドーパント起因の特性ばらつきに対する耐性も期待されている。以上の点から、グラフェンは現状のLSIにおける低消費電力化への障害を解決する可能性を秘めており、ポストシリコン世代の新しい機能性原子薄膜を用いた超低消費電力トランジスタの材料としても期待を集めている。しかし、グラフェンにはシリコンなどの半導体にみられるバンドギャップがないことから、スイッチングトランジスタとして使用した場合に電流を十分に遮断することができない。そこで、グラフェンにバンドギャップを生じさせる方法が活発に検討されているが、これまで実用化が期待できる方法は得られていなかった。

■ 研究の経緯 ■

GNCは、内閣府と独立行政法人 日本学術振興会によって運営される最先端研究開発支援プログラム(FIRST)に採択されたプロジェクトを実施するために2010年4月に設立された。産総研研究者と企業5社(株式会社 富士通研究所、株式会社 東芝、株式会社 日立製作所、ルネサスエレクトロニクス株式会社、株式会社 アルバック)からの出向研究者によって構成されている。GNCでは、2010年度より、つくばイノベーションアリーナによる研究支援のフレームワークのもとで、産総研ナノエレクトロニクス研究部門、産総研ナノデバイスセンター、物材機構 WPI-MANA との共同研究体制を構築し、グラフェンのエレクトロニクス応用に関する研究開発を遂行してきた。この研究成果は、FIRSTのプロジェクト「グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発」(中心研究者 横山 直樹)の助成により得られたものである。

■ 研究の内容 ■

ヘリウムイオン顕微鏡を用いて図1に示すグラフェン素子の中心部にヘリウムイオンビームを適量照射することにより、グラフェンの電気伝導状態を変化させた。この素子の不要な部分のグラフェンも、高い照射量のヘリウムイオンビームで絶縁化した(図1)。このグラフェンは、グラファイト結晶から単離し、シリコン基板上の二酸化シリコン絶縁膜表面に貼り付けられたものであり、電気特性評価用に電極が形成されている。

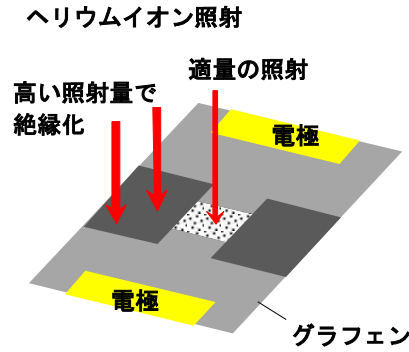


図 1 試作したグラフェン素子におけるヘリウムイオン照射領域の概念図

前述のヘリウムイオン照射の効果でグラフェンを流れる電流が急激に減少する(図 2)。このとき、ヘリウムイオン照射量に従って、図 1 の適量に照射された領域のグラフェンに原子サイズの結晶欠陥が 0.1%から 1%程度の低密度で導入される。これらの低密度の欠陥の効果でグラフェンを流れる電流が抑制されるようになる。

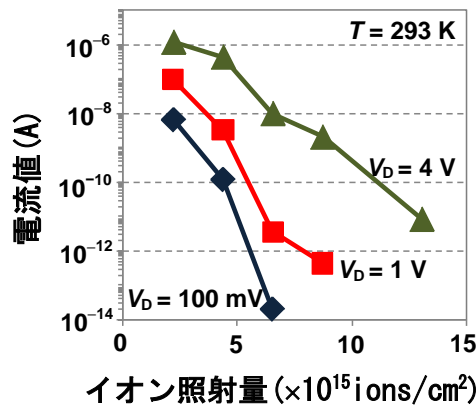


図 2 イオン照射量に対する電流値の変化

これらの低密度欠陥の導入によって、グラフェンのフェルミ準位付近の状態密度の比較的低いエネルギーに、トランスポートギャップと呼ばれる状態が生じ、フェルミ準位がこのトランスポートギャップ内にある場合は電流が流れない。グラフェンとバックゲート電極の間に電圧を与えることで、グラフェンのフェルミ準位のエネルギーは増減できるため、バックゲートの電圧で電流を変調させることができる。このようにして機能化されたグラフェンにおいて、室温で約 2 桁のオン・オフ比を実現した(図 3)。結晶欠陥で機能化されたグラフェンにおいて、これまで室温でオン・オフ比が 1 桁を超えたことはなかったが、今回初めて室温で 2 桁以上のオン・オフ比を実現した。

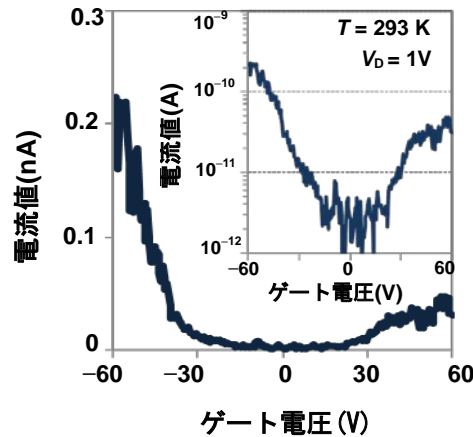


図3 ヘリウムイオン照射で機能化されたグラフェンの室温における電流のオン・オフ動作（照射量 $8.7 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ ）。挿入図はその対数プロット。

この方法によるグラフェンの機能化は、広い面積のグラフェンのままで加工できることから、極細線の端制御が非常に難しいグラフェンナノリボン化よりも有望な技術となる可能性がある。また、通常のリソグラフィー技術と合わせれば、ウェハ全面へのイオン照射によるプロセスが可能であるため、従来のシリコン CMOS 製造技術の枠内においても加工が可能である。

■ 今後の予定 ■

トップゲート制御によるトランジスタ動作を実現し、さらに大面積ウェハによる素子試作を目指す。同時に、機能化されたグラフェンの電気特性、特に電流のオン・オフ比の向上や、電荷の移動度の向上のためにグラフェンの高品質化を実現していく。

■ 本件問い合わせ先 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所

ナノエレクトロニクス研究部門 連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター

連携研究体長 横山 直樹 〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1 西 7A

TEL : 029-849-1607 FAX : 029-849-1186

E-mail : yokoyama.naoki@aist.go.jp

ナノエレクトロニクス研究部門 連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター

特定集中研究専門員 佐藤 信太郎 〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1 西 7A

TEL : 029-849-1485 FAX : 029-849-1186

E-mail : shintaro.sato@aist.go.jp

独立行政法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点

主任研究者 塚越 一仁 〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1

TEL : 029-860-4894

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

【プレス発表／取材に関する窓口】

独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部 報道室

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

つくば本部・情報技術共同研究棟 8F

TEL : 029-862-6216 FAX : 029-862-6212 E-mail : press-ml@aist.go.jp

独立行政法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL : 029-859-2026 FAX : 029-859-2017 E-mail : info@nims.go.jp

【用語の説明】

◆グラフェン

グラファイトを構成する単原子薄膜であり、炭素原子が平面上で蜂の巣格子状に並んだ構造をもつ。2004年に英国マンチェスター大学のグループにより粘着テープでグラファイトから単離され、その特異な物理が明らかにされて以降、世界中で急速に研究が進められた。マンチェスター大学のグループはこの功績で、2010年ノーベル物理学賞を受賞した。

◆ヘリウムイオン顕微鏡

イオン顕微鏡の一種であり、電界で加速されたヘリウムイオンビームを物質に照射した際に生じる2次電子や反射イオンなどを検出し、物質の形状を観察する顕微鏡。原理は走査型電子顕微鏡とほぼ同等であるが、ヘリウムイオンビームは物質波の波長が電子線の波長よりも短く電子線よりも強く収束できることから、より高い解像度で観察できる。またヘリウムイオン照射量を制御することにより被照射試料のエッチング、物性制御が可能である。

◆結晶欠陥

結晶の周期構造が局所的に破壊されたもの。グラフェンの場合は、隣接した2つの炭素原子の並びが90度回転したストーン・ウェールズ欠陥や、原子空孔などが知られている。これらの結晶構造の乱れによって、結晶内で自由に動き回れる電子と正孔(伝導電荷)に対して局所的な強い乱れが生じるため、伝導電荷の散乱の原因となる。

◆正孔

半導体中で電子が欠落した部分で、正の電荷をもった電子のように振る舞う。

◆大規模集積回路(LSI)

多数のトランジスタなどを、半導体結晶表面に集積して構成する回路の集合体。現代の論理回路ではほぼすべてシリコン結晶の表面に形成され、現代のエレクトロニクスの基幹を成す。

◆短チャネル効果

MOS型トランジスタのチャネル長が短くなるのに従って、トランジスタの電気的特性が劣化すること。特に、ソース・ドレインから生じる空乏層が、チャネル長が短いために接近することに起因してゲート動作が劣化する。チャネル下に埋め込み酸化膜層をもつSi-on-Insulator(SOI)構造は、この短チャネル効果を低減するための技術の一つである。

◆ドーパント起因の特性ばらつき

電流を流すのが難しい半導体に電流を流しやすくするため、少量の不純物を意図的に混入させることをドーピングといい、そのために混入された不純物をドーパントという。トランジスタには、チャネル、ソース・ドレイン、ゲート電極など、多くのドーパントが導入されているが、トランジスタが微細化された結果、ドーパントの密度や位置のわずかなゆらぎが閾値電圧などの電気特性に与える影響が相対的に大きくなり、その結果トランジスタのさらなる微細化を妨げる主要因の一つとされるまでになった。このようなトランジスタの特性ばらつきの影響を避けるために、回路全体の動作電圧を高くとる必要があり、これがLSIの消費電力低減の障害となっている。このような特性ばらつきの影響を回避するための技術が検討されている。

◆バンドギャップ

物質の周期的な結晶構造に起因して、結晶内の電子の取り得るエネルギーがバンド構造を形成するが、その際の電子が取り得る状態がないエネルギーの範囲を禁制帯、あるいはバンドギャップという。このバンドギャップが大きく、そのバンドギャップ内にフェルミ準位が存在する物質が、絶縁体である。一方、バンドギャップ内にフェルミ準位があるが、バンドギャップが比較的小さく、電気伝導が不純物注入や電界効果で容易に制御できる物質が、半導体である。

◆フェルミ準位

導体内の電子系においては、絶対零度の電子のもつエネルギーのうち最も高いエネルギーに相当するが、半導体や絶縁体では、このフェルミ準位はもともとバンドギャップ内にあるため、温

度や不純物ドーピングなどの状況によって変化する。フェルミ準位付近のエネルギーをもつ電子が電気伝導に寄与できるが、フェルミ準位がバンドギャップ内にあったり、フェルミ準位付近の電子が局在していれば、電流は流れにくい。

◆トランスポートギャップ

伝導電荷が空間的に局在する導体において状態密度が高い状態までフェルミ準位を上昇させると、局在状態どうしの空間的な距離が縮まり、互いに重なり合うようになる。その結果、物質全体にわたって電荷の輸送が可能になる。この場合の輸送の有無を隔てるエネルギー準位を移動度端 (mobility edge) といい、移動度端に挟まれた局在状態を生じるエネルギーの範囲をトランスポートギャップという。

◆バックゲート

グラフェンは、表面を酸化したシリコン基板に貼り付けるが、この酸化膜は絶縁体であるため、基板のシリコンと表面のグラフェンの間は平行平板コンデンサーを形成する。そのため、シリコン基板はグラフェンに対してゲート電極として動作させることができる。この場合シリコン基板は、素子を形成する表面に対して裏側にあたるため、特にバックゲートという。

◆オン・オフ比

ゲート制御によってチャネルの電流を増減させる場合の、最大電流値 (オン電流) の最小電流値 (オフ電流) に対する比。オン電流が小さいと回路の動作が遅くなり、オフ電流が大きいとリーク電流による電力消費が大きくなるため、オン・オフ比が大きい方がトランジスタには望ましい。一般的には低温の方がオフ電流が強く抑制される傾向があるため、オン・オフ比が大きい。グラフェンにおいては、室温でオン・オフ比が 10 を超える例はわずかしかない。

◆グラフェンナノリボン

おおむね幅 10 nm 以下の極細線のグラフェンをグラフェンナノリボン (GNR) という。理論的には端の形状 (アームチェア型、ジグザグ型) とその幅に従って金属的、あるいは半導体的な伝導を示すことが、2004 年のグラフェンの単離より以前に日本のグループによって指摘されていた。実験的には、化学的に形成された GNR や、カーボンナノチューブを切り開いたものは、比較的大きな電流のオン・オフ比を示す。しかし、実際の GNR での電気伝導は、端の形状よりもリボン幅に強く依存することが知られており、結晶欠陥やリボン端の乱れなどに起因したポテンシャルの乱れでトランスポートギャップが生じているとの指摘がなされている。

◆リソグラフィ

基板上に素子や回路の構造を転写するための技術であり、基板上に塗布されたレジスト (感光剤) を、光や電子線などを照射して状態を変化させ、その部分のみ (またはその以外の部分のみ) のレジストを除去する。レジストが除去されて、露出した基板の部分のみに対してエッチングやイオン注入などの処理が可能となる。

◆トップゲート

基板上的個別のトランジスタに対して絶縁膜を介して形成される電極であり、基板に対して素子の上部から覆う形で形成されるため、特にトップゲートという。バックゲートが基板上的すべての素子に作用するのに対して、トップゲートは個別の素子を制御する。