

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）



炭素原子層 1 層のシートを使って結合量子ドット素子を実現！

— 新カーボン材料による集積化ナノ量子デバイス開発へ道 —

平成 21 年 7 月 10 日

独立行政法人物質・材料研究機構

独立行政法人理化学研究所

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野 正和）の森山 悟士 独立研究者らは、独立行政法人理化学研究所（理事長：野依 良治）の石橋 幸治 主任研究員らと共同で、炭素原子が蜂の巣状に並んだ原子層 1 層のシート（以下、グラフェン）を用いて 2 つの量子ドット¹⁾を結合させた 2 重結合量子ドット²⁾素子を作製することに成功した。
2. 本研究では、グラフェンが三層（厚さはおよそ 1 ナノメートル）からなるグラフェンシートに対し、電子線ビームリソグラフィ³⁾と反応性イオンエッチング⁴⁾技術を用いてシートを直接加工することにより、電子を閉じ込める 2 つの近接した量子ドットや、電気伝導を制御する電極等のデバイス構造を全て同じ一枚のグラフェンシートで作製した。そして量子ドットの中に電子が 1 個ずつ入る単一電子デバイス動作の実証と、2 つの量子ドット間の電子の結合をグラフェンゲート電極によって変化させることに成功し、最も基本的な集積化ナノデバイスである結合量子ドット素子を実現した。
3. 量子ドットは単電子素子や量子ビット⁵⁾の基本構造であり、本研究によって新カーボン材料による集積化ナノデバイス開発の可能性が示されたことから、グラフェン材料を用いた単電子エレクトロニクス⁶⁾や、量子コンピュータ⁵⁾などのいわゆる Beyond CMOS と呼ばれる新機能ナノエレクトロニクスのデバイス開発の進展につながると期待される。
本成果は米国の学術専門誌『Nano Letters』に近日中に掲載される予定である。

研究の背景

グラフェンは炭素原子が蜂の巣状に並んだ原子層一層のシートであり、それらが積み重なるとグラファイトに、また筒状に丸めるとカーボンナノチューブになる炭素材料である。グラファイトは鉛筆の芯の材料等、非常に身近な物質であるが、グラファイトを構成する一層のグラフェンを取り出し、その特性を調べることは困難であった。近年、英国マンチェスター大学のグループが、このグラファイト結晶から粘着性テープを用いてグラファイトの薄膜を引き剥がす方法により、原子層一層のグラフェンを取り出すことに成功した。そして一層から数層のグラフェンシートの電気伝導が調べられ、室温で高い電子移動度を持つことなどから、電子デバイス材料として非常に注目されている。また、2次元的に広がった構造から、最先端のナノ微細加工技術を用いてシートを直接加工することによって、様々なナノ構造・ナノデバイスを簡単に作製することができる。シリコン集積回路の微細化の限界が具体的に見え始めた今、それと相補的な新しいナノエレクトロニクス材料として期待されており、グラフェンシートの大量作製や集積化可能なナノデバイスの研究開発が求められている。

研究成果の内容

本研究では、量子コンピュータや単電子エレクトロニクスの基本素子となる量子ドットを2つ結合させた最も基本的な量子集積回路である2重結合量子ドット素子をグラフェンシート上に作製した。絶縁基板に取り出した、グラフェンが三層（厚さはおよそ1ナノメートル）からなるグラフェンシートに対して、電子線ビームリソグラフィと反応性イオンエッチング技術を用いてシートを直接加工することにより、①電子を閉じ込める2つの近接した量子ドット、②量子ドットに電流を流すための電極（ソース・ドレイン電極）、そして、③量子ドットに閉じ込められた電子のエネルギー状態を制御する電極（ゲート電極）、の3つの構造を全て同じ一枚のグラフェンシートで作製した。図1(b)の三角形の形をした部分が電子の閉じ込められる量子ドットに相当し、長さ20ナノメートル、幅15ナノメートルの非常に微小な領域を介してソース・ドレイン電極につながっている。量子ドットのようなナノスケールでは、電流を流すときに電子を1個、量子ドットに入れるために必要なエネルギーでさえも無視できなくなる。このエネルギーは、ゲート電圧をかけて与えることができるので、ゲート電圧を制御することによって電子数を1個単位で正確に量子ドットに入れることができる。したがって、このような量子ドットデバイスは単電子トランジスタとして動作する。実験では、2つの量子ドット中の電子数をグラフェンゲート電極の電圧を変えることによって、1個単位で制御することに成功した。図2の白い点線で示す六角形の中に相当するゲート電圧では、ドット内の電子数は一定（ドット1の電子数は n 個、ドット2の電子数は m 個）に保たれており、ゲート電圧の値を変えることによって、それぞれの量子ドットの電子数を1個単位で変えることができる。また、この六角形の形は2つの量子ドット間の結合の強さを表しており、これもゲート電圧を変えることにより六角形の形が変化し、量子ドット間の結合が静電的な結合からトンネル的な結合に変化する様子が観測された。

以上のように、グラフェンをナノ微細加工することによって、2重結合量子ドット素子

を作製し、グラフェンゲート電極によって、量子ドットの電子数の制御、量子ドット間の結合の制御が全て電圧によってコントロールできる、チューナブルな結合量子ドット素子を実現した。

本研究は物質・材料研究機構が研究デザイン、試料設計及び試料作製実験を行い、理化学研究所の低温実験装置を使用して測定し、得られた実験結果に関して双方のメンバーで論議し、解析したものである。

波及効果と今後の展開

量子ドットは単電子エレクトロニクスや量子コンピュータの基本素子である量子ビットなどを動作させるための基本構造であるため、様々な材料で研究が行われている。特にエレクトロニクスとしてのデバイス化を考えた場合、単体基本素子の実証だけではなく、量子ドット素子を多数集積化した大規模な量子回路を実現できなければならない。そのような中、今回作製されたグラフェン結合量子ドット素子は、最も基本的な集積化ナノデバイスであり、グラフェンシートの2次元的に広がった構造を活かして、さらなる大規模な量子ドット集積回路の作製へ研究を進めることができる。

また、すべてカーボン原子で形成されているグラフェン材料では、電子スピン⁷⁾のコヒーレンスが長くなると理論的に予測されており、今回制御することに成功した電子1個の電荷状態のみならず、単一電子スピン状態の制御も目指して研究を進めていく予定である。

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 FAX：029-859-2017

独立行政法人理化学研究所

広報室

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

TEL：048-467-9272 FAX：048-462-4715

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ニクス研究拠点

独立研究者 森山 悟士

TEL：029-860-4405

FAX：029-860-4706

E-mail：MORIYAMA.Satoshi@nims.go.jp

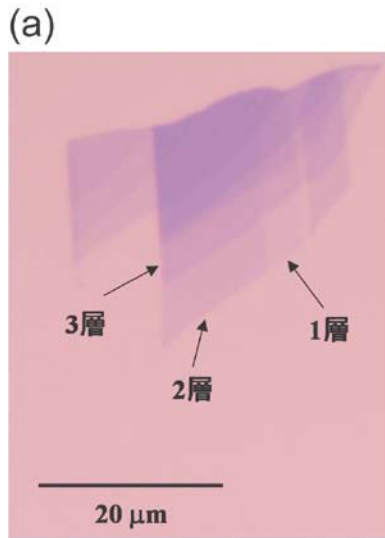


図 1: (a) SiO_2 基板上に貼り付けられた 1 層から数層のグラフェンシートの場合 (光学顕微鏡写真)。(b) 今回作製したグラフェン結合量子ドット素子構造の電子顕微鏡写真。濃い灰色の部分グラフェンシートで、薄い灰色の部分ナノ微細加工プロセスによってグラフェンシートを削り取った部分。中央の三角形の形状部分が量子ドットに相当する。(c) デバイスのスケールと模式図。量子ドットの面積はそれぞれドット 1: $0.004 \mu\text{m}^2$ 、ドット 2: $0.005 \mu\text{m}^2$

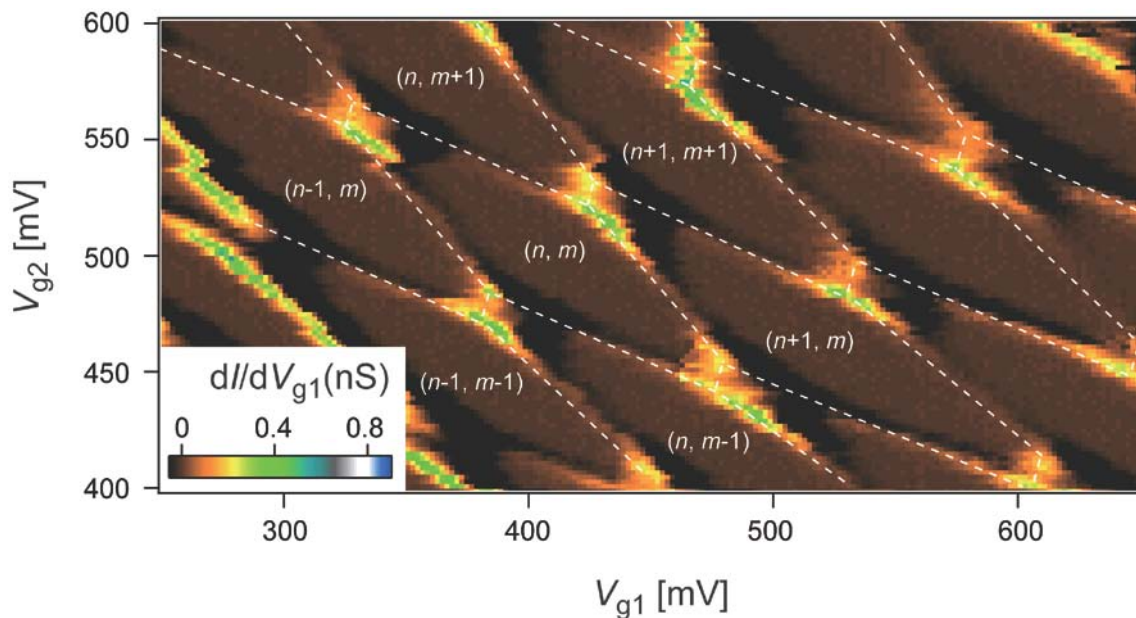
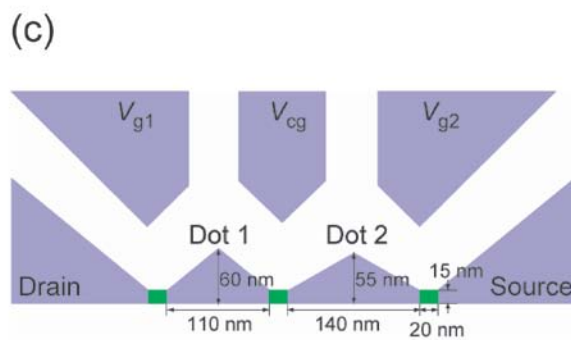
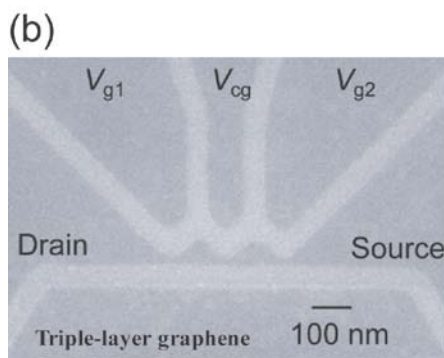


図 2: 2 つの量子ドット内の電子数を 1 個単位で制御していることを示す図。茶色の部分では電流が流れず、黄色～緑色の部分でのみ電流が流れていることを示す。それぞれのドット内の電子数 (n, m) が白い点線で示す一つの六角形のゲート電圧領域内では一定に保たれており、隣接する別の六角形の領域にゲート電圧を設定するとドット内の電子数が 1 個単位で変化する。

【用語解説】

1) 量子ドット

微小な空間に電子を閉じ込めている構造。原子が原子核の周りに電子を捕えている描像とのアナロジーから人工原子と考えることもできる。自然の原子とは異なり、電圧等で人工原子内の電子数やスピン状態を制御できることが特徴で、それを利用した新機能デバイスの提案・研究が活発に行われている。

2) 結合量子ドット

量子ドットを2つ近接させた構造で、量子ドット内の電子が静電的またトンネル的に結合している構造。自然の分子と同様に静電結合や共有結合の電子状態を形成し、さらに電圧等でその結合状態を制御することが可能であることから、人工分子とも呼ばれる。

3) 電子線ビームリソグラフィ

感光性の材料（レジストと呼ばれる）を塗布した物質の表面に、細く絞った電子線を照射し現像工程を施すことによって、照射された部分とされていない部分からなるパターンを形成する微細加工技術。

4) 反応性イオンエッチング

プラズマ中のイオンや反応性ラジカルを加速して試料に照射することによって、物理的および化学的に試料の形状を加工する技術。

5) 量子コンピュータ・量子ビット

量子力学的な重ね合わせの原理を用いることによって超並列計算を実現するもので、従来のコンピュータよりも飛躍的に効率的な計算が可能になると期待されている。通常のコンピュータでは、情報は2進数で表され、0か1のどちらかを取るビットを単位として計算を行うのに対して、量子コンピュータでは、情報の単位として、0と1だけでなく、それらを重ね合わせた量子状態を基本単位とし、これを量子ビットと呼ぶ。実現するためには重ね合わせ状態を維持する時間（コヒーレンス時間と呼ばれる）が十分長いことが要求される。このような2つの状態が重ね合わさった量子状態を実現する物理系として、今回の結合量子ドットの電荷状態（それぞれの量子ドットのどちらかに電子が1個いる状態を0または1とし、重ね合わせ状態を量子ドット間の結合を制御することによって実現する）や、電子スピン・核スピンを利用するもの等が提案され、研究が進められている。

6) 単電子エレクトロニクス

量子ドットでは電子数を1個単位で変えることができることを利用し、それをトランジスタ（単電子トランジスタ）素子として電子数を1個単位で制御した新しいエレクトロニクス。素子のサイズも小さくなることから、さらなる高集積化へも適応し、また少数電子での動作によって低消費電力化が見込める。

7) 電子スピン

電子は電荷だけでなく、自転に対応するような量子力学的なスピンという性質を持つ。電子のスピン状態では2つの量子状態とその重ね合わせ状態を実現できることから、量子ビットの有力な候補と考えられている。