



東北大学



(C)Public Relations Division  
Faculty of Engineering  
The University of Tokyo

FACULTY OF ENGINEERING  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

報道機関各位

東北大学電気通信研究所  
東京大学大学院工学研究科  
東北大学学際科学フロンティア研究所

平成 26 年 1 月 14 日

## グラフェンデバイス動作時における相対論的量子力学に因り発現する 多体効果のナノスケール制御に成功

### <概要>

東北大学電気通信研究所の吹留博一准教授らは、(公財)高輝度光科学研究センター、東京大学大学院工学研究科、東北大学学際科学フロンティア研究所と共同で、有望な次世代材料であるグラフェンを用いたデバイスの動作時における、相対論的量子力学に起因して発現する多体効果のナノスケール制御に成功しました。この結果は、基礎的に興味深いだけでなく、実際のグラフェンのデバイス動作機構において多体効果が重要な因子となり得ることを示唆します。

## <背景>

蜂の巣状に配列した炭素原子からなるグラフェン<sup>注1</sup>は、直線的なバンド構造を有します。そのため、グラフェン中の荷電キャリア（電子、及び、電子の抜けた穴である正孔）は、通常のデバイス材料（例：シリコン）が従う量子力学ではなく、相対論的量子力学<sup>注2</sup>に従い、通常材料に比して優れた電子・光物性（例：シリコンの100倍以上のキャリア移動度）を有します。



図1 グラフェンの直線的なバンド分散構造

ゆえに、グラフェンは次世代デバイス材料として有望視され、世界中で研究開発されています。しかし、グラフェンを用いたデバイス、例えば、トランジスタの特性は、その理論値から予想される値を下回っています。その大きな理由の一つとして、デバイスプロセスの未成熟さが挙げられます。

もう一つの理由として、多体効果<sup>注3</sup>が挙げられます。多体効果とは、多くの素粒子（電子・正孔など）間に働く相互作用を指します。その一例として、クーロン力により束縛された電子・正孔対（励起子）に働く相互作用（励起子効果）が挙げられます。多体効果は、グラフェン中のキャリアが相対論的量子力学に従う為に顕著となります。このことから、多体効果を見逃した場合には一直線となるバンド構造に、多体効果に起因した折れ曲がり等が生じ得ることとなります。ゆえに、グラフェンの優れた物性、例えば、キャリア移動度は、多体効果により変調を受ける可能性が出て来ます。ゆえに、多体効果は、グラフェンを用いた光デバイスや高速電子デバイスの特性を変化させることが予想されます。

## <成果の内容>

東北大学電気通信研究所の吹留准教授・佐藤氏（大学院生）・末光教授、（公財）高輝度光科学研究センターの小嗣博士・大河内博士・木下博士、東京大学大学院工学研究科の長汐准教授・鳥海教授、東北大学学際科学フロンティア研究センターの伊藤准教授らは、大型放射光施設 SPring-8<sup>注4</sup> の BL17SU に設置されている光電子顕微鏡<sup>注5</sup>を用いて、実際のグラフェンを用いたトランジスタ<sup>注6</sup>の動作に近い状態（ゲート電圧印加下）での、グラフェンの電子状態をナノスケールで調べました（図2）。この実験により、具体的には下記二つの多体効果を調べました。

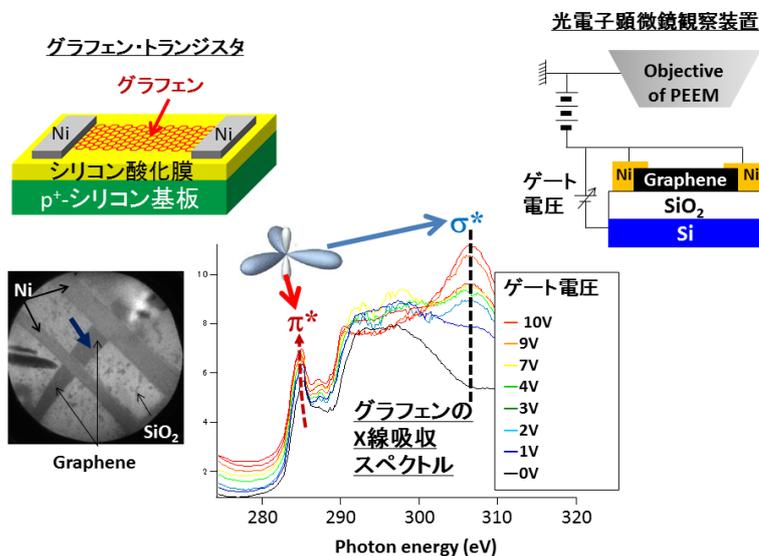


図2 今回の実験の概略

励起子効果：クーロン引力により結び付けられた電子と X 線照射により瞬間的に生成する内殻正孔のペアに働く相互作用

アンダーソン直交性崩壊：X 線照射により瞬間的に生成する内殻正孔により周りの電子の状態をかき乱す相互作用

この光電子顕微鏡による観察から、グラフェン中の電子は、多体効果を顕著に受けることが明らかとなり、しかも、その多体効果の大きさが、グラフェン・トランジスタの基本動作パラメータであるゲート電圧<sup>注7</sup>の値により変化することが明らかとなりました。

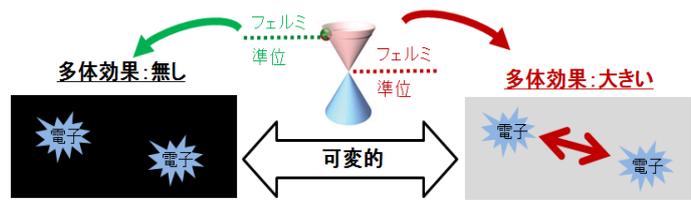


図3 多体効果とフェルミ準位の関係

この結果は、ゲート電圧印加により変調さ

れるフェルミ準位により決まる荷電キャリア（電子もしくは正孔）密度により、多体効果の大きさが決定されることを意味します（図3）。

また、分子軌道<sup>注8</sup>の性格により、この多体効果を受けやすさが異なることが明らかとなりました；

- ・グラフェン中の電気伝導に直接関わる $\pi$ 軌道は、多体効果を受けやすい
- ・グラフェン中の炭素原子を結び付ける骨格である $\sigma$ 軌道は、多体効果を受けにくい

さらには、グラフェンと電極間界面において、上記の多体効果を調べました。その結果、グラフェンと金属電極間に生じる電荷移動により、多体効果がこの界面近傍でナノスケールで変化していることが明らかとなりました。

#### <まとめ及び今後の展開>

以上の結果から、グラフェン中の電子は従来考えられていたような単純な振る舞いをするのではなく、ゲート電圧や金属電極との界面により変調される電子の個数（フェルミ準位）や分子軌道の種類に依存する多体効果によって、その振る舞いが制御可能であることを明らかにしました。

この知見は、グラフェンを用いた光デバイスや高速電子デバイスの特性を最適化させる際に極めて有用なものです。

#### <研究助成金等>

- ・SPRING-8 利用課題（2011A1646, 2011B1877, 2012A1626）
- ・東北大学学際科学フロンティア研究所 学際領域研究及び特別推進研究
- ・東北大学電気通信研究所独創的研究支援プログラム

#### <掲載論文名>

題名：Orbital-specific Tunability of Many-Body Effects in Bilayer Graphene by Gate Bias and Metal Contact

著者：Hirokazu Fukidome, Masato Kotsugi, Kosuke Nagashio, Ryo Sato, Takuo Ohkochi, Takashi Itoh, Akira Toriumi, Maki Suemitsu & Toyohiko Kinoshita

雑誌名：Scientific Reports (Nature Publishing Group)

(論文公開解禁日時：2014年1月16日午前10時(イギリス現地時間))

(お問い合わせ先)

東北大学電気通信研究所 吹留博一

電話番号 : 022-217-5484

e-mail: [fukidome@riec.tohoku.ac.jp](mailto:fukidome@riec.tohoku.ac.jp)

## <用語説明>

### 注1) グラフェン

グラファイト（黒鉛）結晶の単層分。炭素原子が蜂の巣状に六角形ネットワークを組んで2次元シートを形成している（図1）。半導体と金属の両要素をあわせ持つ物質で、ポストシリコン材料として期待されている。グラフェンを円筒状に巻くとカーボンナノチューブになる。

### 注2) 相対論的量子力学

光速に近い速度で運動するような素粒子（例：電子）に対して、相対性理論（相対論）の要請を満たすように拡張された量子力学。

### 注3) 多体効果

低次元電子系（一次元、二次元等）において顕著となる、多くの素粒子（電子や正孔）の間に働く相互作用の効果。本研究で取り扱った具体的な多体効果は、内殻正孔と電子の間に働く励起子効果や、内殻正孔が周りの電子の状態をかき乱すアンダーソン直交性崩壊、の二種類である。

### 注4) 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある、世界最高の放射光を生み出す理化学研究所の施設。その管理運営は高輝度光科学研究センターが行っている。SPring-8の名前は **Super Photon ring-8GeV** に由来。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波のこと。SPring-8ではこの放射光を用いて、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究を行っている。

### 注5) 光電子顕微鏡

固体に一定エネルギーの電磁波をあて、光電効果によって外に飛び出してきた電子（光電子とよばれる）のエネルギーを測定し固体の電子状態を調べる光電子分光法と顕微観察手法を融合させた空間分解能を有する分光手法

### 注6) トランジスタ

ゲート電極に電圧をかけ、チャネルの電界により電子または正孔の流れに閉門（ゲート）を設ける原理で、ソース・ドレイン端子間の電流を制御する トランジスタ である。デジタル論理回路の基本素子として使われる。

### 注7) ゲート電圧

トランジスタに流れる電流の大きさを制御するために、チャネルとゲート電極に印加する電圧。

### 注8) 分子軌道

分子内を運動する電子の運動状態を表す軌道。グラフェンにおける電気伝導を担う  $\pi$  軌道や、骨格となる  $\sigma$  軌道、などが含まれる。