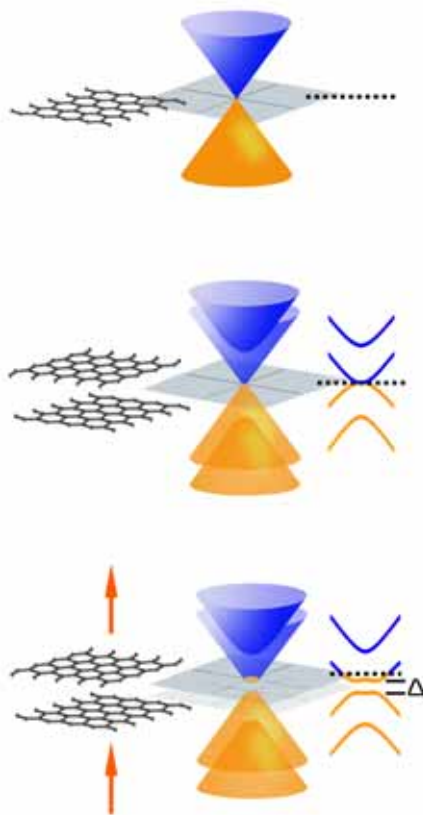


【電子・情報通信技術】

二層グラフェンでバンドギャップ 0~250meV の制御に成功 (米国)

ナノエレクトロニクスとナノフォトニクスに新たな道が開かれる

グラフェンの電気特性の一つに、電子の移動度が高い(光速に近い)ことがある。しかし、バンドギャップがなければ、グラフェンを用いたエレクトロニクスやフォトニクスは実現できない。ある研究者達が、二層グラフェンのバンドギャップを作り出して、0meVから赤外光領域まで正確に調節することに成功した。



単層グラフェン(上の図)の最も変わった性質の一つは、円錐形の伝導帯と価電子帯がポイントで接することである。バンドギャップはない。

対照的な二層グラフェン(中央の図)にも、バンドギャップはない。

二層構造(下の図)は、電界(図の矢印)によって非対称となり、バンドギャップ(Δ)が作られる。このバンドギャップは選択して調節できる。

(出所:バークレー研究所)

グラフェンは炭素が二次元結晶を形成したものである。グラフェンが持つ、極端に高い電子の移動度やその他の独自の特性は、ナノスケールのエレクトロニクスとフォトニクスへの利用に大変有望である。しかし問題がある。それは、グラフェンにはバンドギャップがないことである。

「グラフェンをエレクトロニクスに使用する上で、バンドギャップがないことは大きな制約となる」と、米国エネルギー省(DOE)のローレンス・バークレー国立研究所材料科学部門の Feng Wang は話す。「たとえば、グラフェンを用いて電界効果トランジスタ(FET:

field-effect transistor)の形成は行えても、バンドギャップがないためオフにできない。しかし、もしグラフェンでバンドギャップを作り出すことができれば、より質の良いトランジスタを作製できるはずである。」

カリフォルニア大学バークレー校の物理学部准教授でもある Wang はまさにこれを成功させた。Wang と彼の同僚は二層グラフェン中にバンドギャップを作り出し、0 ~ 250meV(0.25eV)の間で正確に制御することができた。

さらに、彼らの実験は室温で実施されており、デバイスの冷却は必要ない。今回のブレークスルーによって可能となる用途には、新しいタイプのナノトランジスタや、そのバンドギャップの狭さから、赤外光領域のナノ LED もしくはナノスケール光学デバイスが見込まれる。

同研究者達は科学雑誌 *Nature* の 6 月 11 月号で今回の研究を発表している。

二層グラフェンを用いたトランジスタの作製

単層グラフェン(炭素原子が「六角形格子」構成で配列)と同じく、二層グラフェン(一つのグラフェン層の上にもう片方の層が乗っている構成)もバンドギャップがゼロであり、金属のように振舞う。しかし、二つの層の鏡面のような対称性が攪乱されれば、バンドギャップが生じる。バンドギャップが生じると、二層グラフェンは半導体のように振舞う。

これまでも 2006 年に、バークレー研究所の放射光施設(ALS: Advanced Light Source)の研究者達が、二層グラフェンでバンドギャップを観察している。この二層グラフェンは、片方の層が、金属原子の吸着によって化学ドーピング^{注1}された。しかしこのような化学的ドーピングは制御が行えず、デバイスへの利用には適応できない。

「二層グラフェンのバンドギャップを作ること、特にその制御を行うことは、壮大な目標であった」と Wang は話す。「残念ながら、化学ドーピングで制御を行うのは困難である。」

次に研究者達は、基板を化学的にドーピングするかわりに電氣的にドーピングすることによって、二層グラフェンのバンドギャップ調節を試みた。これには、垂直に印加された、連続的に制御できる電界を用いた。しかしこのような電界が一つのゲート(電極)に印加される場合は、1 ケルビン(絶対零度近く)を下回る温度でのみ、二層グラフェンが絶縁

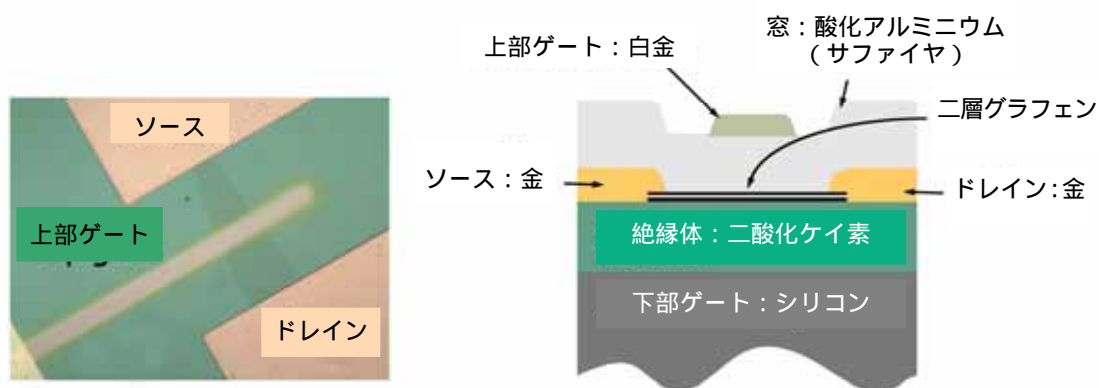
注1 ドープともいう。結晶の物性を変化させるために少量の不純物を添加すること。電子などの濃度を調整するほか、バンド構造や物理的特性などの調節・制御を行う。

となる。このことは、理論上の予測よりもバンドギャップの値がかなり低いことを示唆している。

Wang は次のように話す。「これらの結果をもってしても、電子的に何が起きているか、もしくはなぜ起きているのかを正確に理解するのは難しかった。」

Wang と彼の同僚は、二層グラフェンでバンドギャップを作り出して測定するという試みを成功に導く、二つの重要な決定を行った。

重要な決定の一つ目は、二つのゲートを付けた二層デバイスを形成したことである。このデバイスは UC バークレー物理学部の Yuanbo Zhang と Tsung-Ta Tang が作製した。これによって研究チームは、電子バンドギャップと電荷ドーピングを独立して調整することが可能となった。



左は二層グラフェンの電界効果トランジスタを上から見た電子顕微鏡画像。

右は同トランジスタの各要素を図示したもの。

(出所：バークレー研究所)

このデバイスはデュアルゲート型の電界効果トランジスタである。このタイプのトランジスタは、ゲート電極で形成された電界によって、ソースからドレインへの電子の流れを制御する。今回作製されたナノ電界効果トランジスタの構成は、最下層のゲートにシリコン基板を据え、その上に二酸化ケイ素(SiO_2)の薄い絶縁体を使用し、さらにその上にグラフェン層を重ねている。その二層グラフェンの上には酸化アルミニウム(サファイヤ)の透明層を置き、最上部には白金のゲートが使用されている。

研究者達が行った二つ目の重要な決定は、彼らが電圧を変化させた時にデバイスに何が起こったのかをより深く理解することであった。彼らは、デバイスの電気抵抗や輸送の測定を行うのではなく、光透過の測定によってバンドギャップを測定することを決めた。

「輸送の測定において問題なのは、欠陥に対して非常に敏感なことである」とWangは話す。「微量の不純物や欠陥のドーピングもグラフェンの電気抵抗を大きく変化させる可能性がある。さらに、その物質固有の振る舞いを隠してしまう恐れもある。私達が放射光施設で光学測定を実施することを決めたのは、このためである。」

放射光施設地球科学部門の物理学者 Michael Martin と Zhao Hao の指揮のもと、Wang と彼の同僚達は、放射光施設で赤外ビームライン 1.4 を使用し、デバイスを貫通するほど強いシンクロトロン光のビームを送って、グラフェン層に光の焦点を当てることができた。研究者達は、ゲート電極の電圧を正確に変化させることによって電界を調節できたため、ゲートを付けたグラフェン層に吸収された光の変化を測定できた。この各スペクトルの吸収ピークによって、各ゲート電圧でのバンドギャップが直接測定できた。

「原理上は、波長可変レーザーを光透過の測定に使用することもできた。しかし、ビームライン 1.4 は大変輝度が高く、回折限界(diffraction limit)^{注2}にまで焦点を合わせることができない。これはグラフェン薄片のターゲットが大変小さい場合には重要なことである」とWangは話す。「さらにビームラインは、レーザーと比較して、一度により広い範囲の周波数を出せるため、測定しようとしている各吸収周波数に苦労して調節をする必要がない。」

バンドギャップをコントロールできる電子構造をもつ二層グラフェン

放射光施設の測定結果は比較的容易に、かつ効率的に取得できた。そして研究者達は、二つのゲートの電圧を独立して操作することによって、二つの重要なパラメータである、バンドギャップの大きさと二層グラフェンのドーパ率を制御することができた。実質彼らは、本質的には全く半導体ではない物質から、仮想の半導体を作製した。

通常半導体は、伝導帯（電子非占有）と価電子帯（電子占有）の間のギャップが限られており、物質の結晶構造によって固定されている。しかしWangの研究チームが実証したように、二層グラフェンではバンドギャップを変えることができ、電界による制御が可能である。二層グラフェンは、そのままではバンドギャップがゼロであり、金属と似た伝導性をもつが、ゲートを付けた二層グラフェンは250meVの大きさのバンドギャップをもつことができ、半導体のように振舞う。

^{注2} 回折限界とは、光が波の性質をもつために、その波長より小さいスケールを扱うことができないという限界を指す。

広い範囲のバンドギャップを精密に制御できたり、電氣的ドーピングにより電子状態を独立して操作できることから、デュアルゲート型の二層グラフェンは、ナノスケールの電子デバイスにとって非常に柔軟性があるツールとなる。

これらの初期の実験はまだ始まったばかりだと Wang は強調する。「私達の実証デバイスの電氣的性能にはまだ限りがある。改善するには、たとえば基板の洗浄に別の手法を用いるなどの多くの方法がある。」

それでも Wang は次のように話す。「私達は、室温で二層グラフェンのバンドギャップを 0~250meV の間で任意に変えられることを実証した。これ自体が驚くべきことであり、二層グラフェンのナノエレクトロニクスに対する可能性も示している。さらに、シリコンやガリウム・ヒ素などの現在普及している半導体よりもバンドギャップが狭い。このため、新しい種類の光電子デバイス たとえば、赤外光を発生・増幅・検知するデバイス を作製できる可能性がある。」

論文「*Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene* (二層グラフェンで広域に調節可能なバンドギャップの直接観察)」は、2009年6月11日号の科学雑誌 *Nature* で発表された^{注3}。論文著者は、Yuanbo Zhang、Tsung-Ta Tang、Caglar Girit、Zhao Hao、Michael C. Martin、Alex Zettl、Michael F. Crommie、Y. Ron Shen および Feng Wang である。(Zhang、Tang および Girit はそれぞれ、UC バークレー物理学部の Crommie、Shen および Zettl 教授のグループに所属。Zettl、Crommie および Shen はバークレー研究所物理科学部門にも所属。)

この研究は米国エネルギー省(DOE)科学局および基礎エネルギー科学局により支援を受けた。

バークレー研究所はカリフォルニア州バークレーに位置する米国エネルギー省の国立研究所である。同研究所は未分類の科学研究を実施しており、カリフォルニア大学により運営されている。詳細はウェブサイトを参照されたい^{注4}。

翻訳：大釜 みどり

出典：「Bilayer Graphene Gets a Bandgap」

<http://newscenter.lbl.gov/press-releases/2009/06/10/graphene-bandgap/>

^{注3} *Nature* 2009年6月11日号「Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene」 <http://www.nature.com/nature/journal/v459/n7248/full/nature08105.html>

^{注4} <http://www.lbl.gov>