

超短パルスレーザーによる グラフェン内の「弾道的」な 電子運動の追跡

サリー・コール・ジョンソン

電氣的な検出方法と比べて、オールオプティカルの超短パルスレーザー手法は、弾道的でコヒーレントな、領域内の電子輸送の研究に必要な、分解能を実現する。

米カンザス大(University of Kansas)の超短パルスレーザー研究所(Ultrafast Laser Lab)の研究者チームは最近、グラフェン内の電子のリアルタイムの弾道輸送を捕捉することに成功した。これは、より高速かつ強力でエネルギー効率に優れた未来の電子デバイスにつながる可能性がある。

電子運動は、固体中の他の粒子との衝突によって、1秒あたり約100～1000億回中断される傾向にある。これによって電子は減速し、エネルギー損失が生じ、余分な熱が発生する。これらの衝突を防ぐことができれば、電子は固体の中で妨げられることなく、空中を飛行する弾道ミサイルのように移動することができる。物理学と天文学の教授であるフイ・ザオ氏(Hui Zhao、図1)は、「超短パルスレーザーは、超高速の時間分解能を備え、最も高速な実験ツールの1つである。固体中の電子の弾道輸送は、非常に短い時間スケールで生じるため、超短パルスレーザーによる電子運動の追跡は、弾道輸送の研究に完璧に適合する」と述べた(図1)。これまでの電氣的測定法によって弾道輸送の特性が明らかになっているが、「その弾道運動を、リアルタイムとリアルスペースで実際に追跡できるというのが素晴らしい。これは、固体中の

電子を監視するための非侵襲的で非破壊的な手段だ」と、ザオ教授は付け加えた。

オールオプティカルの 超短パルスレーザー手法

同チームは、六角形の格子構造を形成する炭素原子の単層からなるグラフェン内の弾道運動を観測した。グラフェンは、「ワンダーマテリアル」(不思議な材料)と呼ばれている。より高速で効率的な次世代の電子デバイスを実現するかもしれない、独特の性質を持つためだ。

「光にエネルギーを与えられることによって電子は解放されて自由に移動できるようになり、電子があった場所に『正孔』が生じる」と、ザオ教授は述べた。しかし、グラフェン内の電子運動は、およそ1兆分の1秒(1ピコ秒)しか続かずに、電子が正孔に戻って終了するため、その動きの追跡は困難である。

この問題の回避策として同チームは、二硫化モリブデンと二セレン化モリブデンで隔離された2つのグラフェン層からなる4層の人工構造を設計して作製した。「2つの単層半導体を2つのグラフェン層の間に挿入することによって、電子と正孔を隔離し、電子がすぐに正孔に戻らないようにしてい

る。これにより、電子運動の性質を解析するための十分な時間が得られる」とザオ教授は語った。合計の厚みがわずか1.5nmの2つの分子層によって、「電子運動をおよそ50ピコ秒間、強制的に継続させる」と、実験を行った博士課程の学生であるライアン・スコット氏(Ryan Scott)は述べた。これだけの時間があれば、研究者は、0.1ピコ秒の速度のレーザーによって十分に電子の運動を追跡することができる。

同チームの測定装置は、超短パルスレーザーをベースとした過渡吸収顕微鏡で、ナノメートルスケールの空間分解能で電子運動を解明することができる



図1 カンザス大超短パルスレーザー研究所のフイ・ザオ教授と、同氏チームの実験設備(写真提供:カンザス大)

る。「われわれの手法は、グラフェン内の移動電子を、光反射に対するその影響を基に追跡する。電子は、その位置における試料の反射率を少し増加させる。これにより、レーザパルスを使用して電子の動きを追跡することができる」とザオ教授は述べた。

言い換えると、同チームは、「ポンプパルス」と呼ばれる集光性の高いレーザパルスを使用して、試料内の電子を解放し、少し遅れて試料に照射される「プローブパルス」と呼ばれる別の集光レーザパルスによって、試料の反射率を観測することで、その動きをトレースする。

そのような小さな変化を検出するために、2万個の電子を一度に解放し、プローブレザを使用して試料に反射させてその反射率を測定した。各データ点につき、このプロセスを8000万回繰り返した。図2は、その主要な結果の一例を、微小な電子の変位と時間のグラフに表したもので、直線は、運

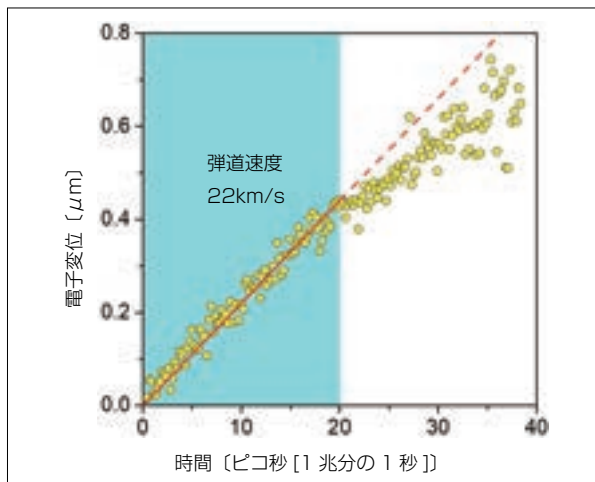
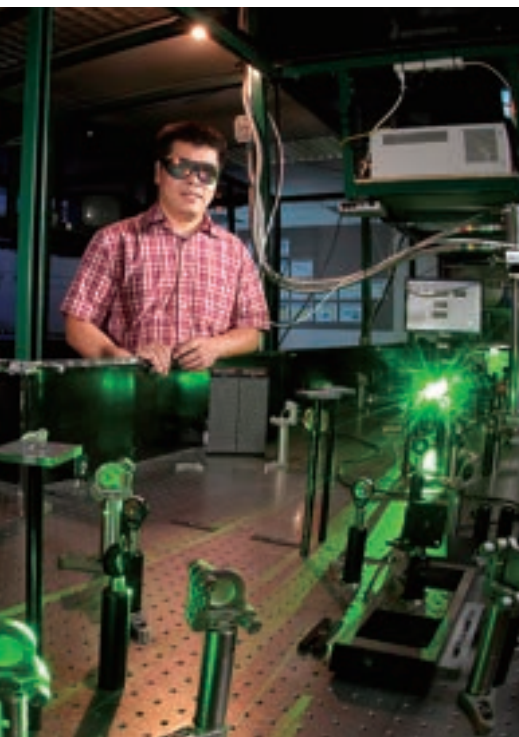


図2 超短パルスレーザの測定値に基づく、グラフェン内の電子の変位と時間のグラフ (写真提供: ザオ教授)

動速度が一定であることを意味する。これに基づいて研究者らは、電子は何か衝突して停止するまで平均で約20ピコ秒間、秒速22kmで弾道運動を続けると結論付けた。

電気的な検出方法と比べて、オールオプティカルの超短パルスレーザ手法は、弾道的でコヒーレントな領域内の電子輸送の研究に必要な分解能を実現する。

同チームの取り組みで最も意外だった側面の1つは、設計したデバイス構造が正しく動作することが初期実験で確認されたことだった。「電子は2つの単層によって正孔から確かに隔離されて、運動状態をより長い時間維持する。従って、その弾道運動を追跡できる可能性が高まったことがわかった。われわれのグループは、さまざまな種類のファンデルワールスヘテロ構造の中の電荷移動を10年間研究してきたため、電子をきめ細かく制御して、より長く運動状態を維持するために、それらの人工構造を使用することがわかって胸が躍った」と、ザオ教授は述べた。

最大の課題は、光信号が弱いために、多数の測定値の平均をとって最終的な特性を導き出す必要があったことである。「それには実験装置を長時間安定

させることが必要で、それを実現するためにいくらかの工夫と単調な作業が必要だった」とザオ教授は述べた。

弾道運動への対応

本当に素晴らしいのは、弾道電子輸送は高速で、散乱(エネルギー損失)がないために、弾道輸送を利用する電子デバイスは、はるかに高速になるとともに、性能とエネルギー効率がより高くなって、遅延と熱の問題が軽減される可能性があることである。

「弾道電子運動を監視するための『レーダーガン』が得られたので、これをツールとして使用して、電界やその他の手段によって電子運動を制御する方法を研究するつもりだ。電子の弾道輸送長を引き延ばすための新しいデバイス設計も探求したいと思う。この研究の試料は室温で保存されていた。より低温に試料を冷却することも、輸送長の延長につながる可能性がある」とザオ教授は述べた。

このプロジェクトは、米エネルギー省(Department of Energy)の助成を受けており、ライアン・スコット氏の研究は、カンザス大のRedeker fellowship and graduate research awardの助成を受けている。