【助成 38-13】

多彩な伝導様式を示すグラフェンモアレ超格子の作製と量子閉じ込めによる新機能の発現

研究者 千葉大学大学院工学研究院 教授 青木 伸之

〔研究の概要〕

本研究では、1枚のグラフェンを半分に切断して1°程度の角度をつけて重ねることで形成されるツイスト型2層 グラフェンを作製し、モアレ長周期構造形成による新しいグラフェン系での特徴的なバンド構造を利用し、「スプリ ットゲート構造による量子閉じ込め効果」を付加することで、その中における特異なキャリアの振る舞いを明らか にすることを目的として研究を進めた。これまで問題となっていた角度緩和の問題に関しては達成し、低温磁気 伝導特性からツイスト型2層グラフェン(TwBLG)となっていることは確認できたものの、マジックアングルで期待さ れる超伝導や Mott 絶縁体といった物性の観測にまでは至らなかった。その原因は試料作製時に混入するバブ ルの存在によって多くの部分でツイストされていない領域ができてしまい、TwBLG の領域が分断されてしまうこと で、完全な超伝導状態や絶縁体状態が実現されなかったと考察し、積層化技術の改善を図った。

〔研究経過および成果〕

本研究では、1枚のグラフェンを半分に切断して 1°程度の角度をつけて重ねることで形成されるツイ スト型2層グラフェン(TwBLG)を作製し、モアレ長周 期構造形成による新しいグラフェン系での特徴的な バンド構造を利用し、「スプリットゲート構造による量 子閉じ込め効果」を付加することで、特異なキャリアの 振る舞いを明らかにし、それを利用した量子デバイス の実現を目指した。本研究では、これまで問題であっ た設定角度からのズレ(角度緩和)の問題を解決する ため,従来使用してきた手動による試料作製方法を 見直し、XYZ θ に対して 0.5 ミクロンステップで動く電 動ステージを導入することで、高精度な位置決めと角 度制御を図った。作製した試料の一つを図1に示す。 この試料は、TwBLG を上下の六方晶窒化ホウ素 (hBN) でカプセル化し, 原子間力顕微鏡 (AFM) によ ってバブルの位置を確認し, バブルが少ない領域を 狙って電子線描画を行い、CHF₃/O₂ ガスによるプラ

ズマエッチングによってホールバー形状に成形し,エ ッジコンタクトによって電極を取り付けた。この試料で は、角度緩和を考慮して作製時に角度を 1.30°で積 層したが、この試料の低温でのゲート電圧特性(図2 (a))を見ると、超格子ギャップ((キャリア密度 $n = \pm$ 1.2×10^{12} /cm²、矢印で示した位置)位置から 1.26° であることが確認され、角度緩和は 0.04°と僅かであ ることがわかった。マジックアングルと言われる 1.08° に対しては+0.18°まで迫ることができた。しかし、こ の試料における満充填(モアレ超格子に対して4つの 電子で満たされた状態)に対応する超格子ギャップ





の位置(キャリア密度 n = ±1.2×10¹² /cm², 矢印で 示した位置)では、伝導度の極小が観測されたものの、 バンドギャップが開いていることで期待される絶縁体 状態となっていない。また, 超格子ギャップの半分の キャリア密度(n = ±0.6×10¹² /cm²)においては,半 充填状態となることからMott絶縁体状態となることが 期待されるものの,この試料では伝導度の減少はほ とんど確認できていない。また半充填状態の近傍で は超伝導の発現も期待されるが, 伝導度の極大が確 認されたものの超伝導状態とはならなかった。しかし、 図2(b)に赤丸で示すように,垂直磁場を印加していく と,伝導度の極大領域はドーム状に減衰していく様 子が確認された。以上の結果から、この試料では確 かにマジックアングルに近い角度でグラフェンがツイ ストされて積層化されているものの,不均一性のため に期待される物性が観測できていないと考えられる。

その原因としては、バブルの存在によってマジックア ングル TwBLG で期待される特性が阻害されているも のと考察した。バブルの原因は,主にグラフェン表面 に付着した有機物による汚染と,積層する際の気泡 の2種類が考えられる。そのため,前者の解決には機 械剥離をしてからの試料作製時間の大幅な短縮,後 者にはレンズ構造の採用と温度制御によって徐々に 接近させることで,気泡を押し出しながら積層化する 方法の導入で解決を図った。その結果,図3のように バブルの排除を達成し、BLG 試料(ツイスト無し)にお いて室温で 29,000 cm²/Vs の高移動度を確認し, 大 幅な改善を図ることができた。今回の研究期間内で はマジックアングル TwBLG で期待される特異な物性 の観測ができなかったが、今後この手法を導入して TwBLG を作製し、スプリット型ゲート構造を用いた量 子伝導現象の観測を進めて行く。



〔発表論文〕

 Kohei Sakanashi, Peter Krüger, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim, David K. Ferry, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki: Signature of spin-resolved quantum point contact in p-type trilayer WSe₂ van der Waals heterostructure, Nano Letters, **21**, 7534-7541 (2021).