

【助成 41-04】

立体的な構造を持つグラフェンによる高性能トランジスタの研究

研究者 筑波大学 数理物質系 准教授 伊藤 良一

共同研究者 岡山理科大学理学部基礎理学科 准教授 田邊 洋一

〔研究の概要〕

曲面を持つ2層グラフェンでは、上層と下層の幾何学構造によるポテンシャル差が生じて空間対称性が破れる可能性があり、本来ラマン不活性である E_u モードフォノンがラマン活性となる可能性がある。この空間対称性の破れは曲面構造を持つグラフェンが本質的に持つ性質と考えられるが、ラマン分光法を用いて曲面を持つグラフェン上でそれらを実際に確認した実験例はまだ報告されていない。そこで本研究では、曲面構造を豊富に持つ多孔質グラフェンを用いた電気2重層トランジスタを作製し、そのデバイスにゲート電圧を印加してグラフェンのフェルミ準位を電荷中性点付近から変調させつつ、同時にラマン分光測定を行い、曲面グラフェンの電子格子相互作用について研究を行った。その結果、-945 mV より小さい印加ゲート電圧で G バンドの分裂を観測した。この起源は、曲面構造による空間反転対称性の破れによって E_u モードのフォノンがラマン活性になったと考えられる。

〔研究経過および成果〕

〔序論〕

グラフェンは炭素が蜂の巣型に結合してできる、高い対称性を持ったシート状の物質である。グラフェンは、その高いキャリア易動度から、電界効果トランジスタとして研究されている。特に、電界効果トランジスタを利用してグラフェンのフェルミ準位を電荷中性点付近から変調させた時、電子格子相互作用がパウリの排他原理によって抑制され、 E_{2g} モードフォノンに由来するラマンスペクトルである G バンドのピーク位置が変化する、また、幾何学構造の変化により E_u モードフォノンがラマン活性になるなど興味深い物性を有している。本助成研究では、これらのフォノン物性について研究を行った。

〔実験方法〕

本多孔質グラフェンは多孔質基材を化学気相蒸着法の鋳型とし、グラフェン成長後酸処理によっ

て得た (図 1)。導電性ゲルを多孔質内部へ充填し、図 1 の電気 2 重層トランジスタを作製した。

作製したデバイスにラマン分光測定装置内に設置した測定用ボックスに接続し、各ゲート電圧に対して、1 回あたり 5 秒のラマン測定を 20 回積算することで得られた。各ゲート電圧印加順番は、17 分の電荷充填待ち時間を経た後、ゲート電圧が 45 mV → -45 mV → 135 mV → -135 mV という順番でプラスとマイナス電圧を入れ替えながら、ゲート電圧の印加を行った。

〔結果・考察〕

図 2 に示す各ゲート電圧での G バンドのスペクトルから、ゲート電圧 45 mV 付近でのソフトニングに加えて、ゲート電圧印加により E_{2g} モードフォノン由来の G バンドのシフトが観測された。各 G バンドのスペクトルに対してガウス関数によるフィッティング解析を行った結果、図 3 のようにピーク

位置のゲート電圧依存性が見られ、ゲート電圧 -945 mV から -1545 mV の間のみ G バンドが分裂するという非対称な結果が得られた (図 3 の分裂ピーク位置 2 が相当)。この起源として、図 1 のように、曲面構造による空間反転対称性の破れによって E_{d} モードのフォノンがラマン活性になっている可能性があり、現在詳しく検討している。

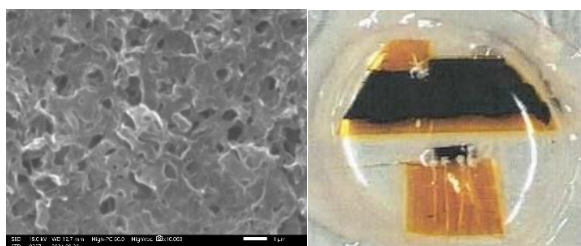


図 1 多孔質グラフェンの SEM 像とそれを用いた電気2重層グラフェントランジスタデバイス。

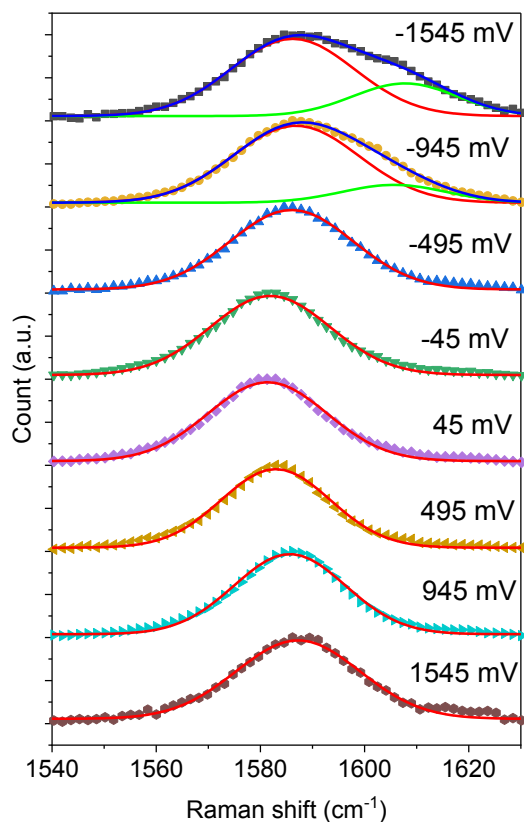


図 2 ゲート電圧に依存した多孔質グラフェンの G

バンドのスペクトル変化。

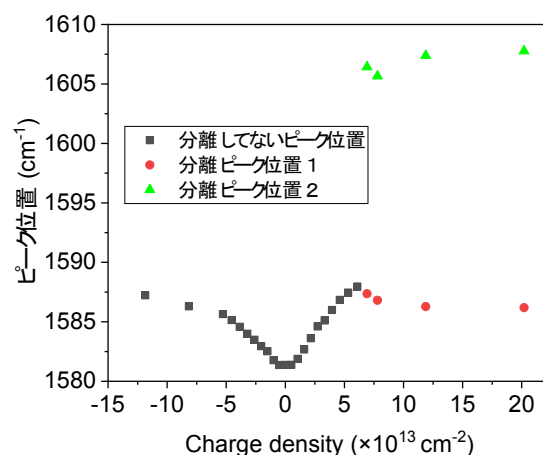


図 3 ゲート電圧 (電荷密度) に依存した多孔質グラフェンの G バンドのピーク位置変化。

[結論]

電気2重層トランジスタデバイスとラマン分光法の同時計測手法を用いて曲面を持つグラフェンのフェルミ準位の変調を行った結果、電子格子相互作用によるフォノンソフトニングと空間反転対称性の破れによる E_{d} モードのフォノンを観測した。今後は、G バンドの分裂について理論家と相談し、その物理的起源について探求を行う予定である。また、同多孔質グラフェンに窒素をドーピングした窒素ドーピング多孔質グラフェンに対して同様の実験を行い、窒素ドーピングによる局所的な格子変形による電子格子相互作用について更なる理解を深める予定である。

[発表論文]

1. Yoichi Tanabe, Yoshikazu Ito et al., Investigation of Electron-Phonon Interactions in Porous Graphene Using an Electric Double Layer Transistor device and Raman Spectroscopy, 2025 年投稿予定