

氏 名	鄧 磊		
授与した学位	博 士		
専攻分野の名称	理 学		
学位授与番号	博甲第	6 3 9 7	号
学位授与の日付	2 0 2 1 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	自然科学研究科 学際基礎科学専攻 (学位規則第4条第1項該当)		
学位論文の題目	Study on electronic properties of two-dimensional materials by using electric double-layer transistors (電気二重層トランジスタを用いた二次元物質の電子状態の研究)		
論文審査委員	准教授 後藤 秀徳	教授 久保園 芳博	教授 横谷 尚睦
学位論文内容の要旨			
<p>Electric double-layer transistors (EDLTs) have been utilized for controlling the electronic properties of various two-dimensional materials (2DMs) via the accumulation of the high-density carriers. In this thesis, the dual-gate structure, which consists of the top gate with the EDL of an ionic gel (IG) and the bottom gate with the solid dielectric, has been employed to distinguish the electric-field effect from the carrier-doping effect. The thesis includes the study on four topics using monolayer graphene (MLG), bilayer graphene (BLG), and topological insulators (TIs), as follows:</p> <p>(1) The electric field produced in the dual-gate FET is quantitatively evaluated from the bandgap (E_g) of BLG. BLG devices were prepared on electron-donating self-assembled monolayers. The values of E_g were evaluated from the minimum conductivity (σ_{\min}) at the charge neutrality point (V_n), which was measured by sweeping the top gate voltage (V_{tg}) at each bottom gate voltage (V_{bg}). The results indicated that the large electric field was produced by combining the electron transfer and the EDL gating to enhance the band gap of BLG.</p> <p>(2) The transport property of MLG is studied under the electric field. The values of σ_{\min} and the mobility increased with the total electric field. Furthermore, the electron mobility was smaller than the hole mobility at the downward electric field, or <i>vice versa</i>, indicating that the electrons (or holes) in MLG were scattered by the cations (or anions) in the IG. The transport in MLG could be controlled by arranging the ions in the IG under the electric field.</p> <p>(3) The difference in the geometrical capacitance \bar{C}_{tg} for the IG on MLG and BLG is explored. The \bar{C}_{tg} was evaluated from the contour plot of V_n as a function of V_{bg} and V_{tg}. By reducing the stray capacitance and experimental errors, \bar{C}_{tg} in BLG was found to be smaller than that in MLG, which was explained by assuming that the penetration depth of the electric field is appended to the EDL thickness.</p> <p>(4) The EDL gating is extended for a TI, $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_2\text{Se}$, to identify the characteristic surface transport by controlling the Fermi level (E_F). The semimetallic behavior changed to be metallic at positive V_{tg} and insulating at negative V_{tg}. The successful tuning of the E_F is the first step toward the detailed research of the surface transport in TIs.</p> <p>In summary, the effects of the electric field on the electronic properties of MLG, BLG, and TI were studied. The author demonstrated that the dual-gate EDLT technique allowed to investigate not only carrier accumulation but also band engineering induced by the electric field. The control of 2DMs with the dual-gate EDLT provides a versatile platform for exploring unprecedented electronic phenomena as well as developing new functional devices.</p>			

論文審査結果の要旨

Zhi Lei君は、イオンゲル(IG)ゲートを有する電気二重層トランジスタ(EDLT)を用いて2次元材料(2DM)の電子状態の研究を行った。これまでEDLTは主として高濃度の伝導キャリアを蓄積させるために用いられてきたが、本研究では上下層からゲート電圧を加えるダブルゲート構造により電界下の2DMの電子状態を調べた。学位論文は単層グラフェン(MLG)、二層グラフェン(BLG)、トポロジカル絶縁体(TI)を対象とする4つの研究から構成され、公聴会ではそのうちの3つの話題が紹介された。

まず、電界の大きさに依存したバンドギャップを示すBLGの性質を利用して、BLGに加わる電界の大きさを定量的に評価した。電子供与性の自己組織化単分子膜が付加的な電界をつくることを明らかにし、重ねてゲート電極へ電圧を加えることにより、さらに電界を増加できる事実を示した点が評価できる。次に、電界によって電子状態が変化しないと予想されるMLGへ電界を加え、伝導現象の変化を調べた。移動度が電界下で有意に増加することを見出し、IG中のイオン整列による静電ポテンシャルの平滑化によって説明した。イオンによる散乱機構を明らかにしたことにより、今後EDLTの特性向上が期待される。EDLTにおいてキャリア蓄積量を決定するキャパシタンス C_{EDL} は、EDLの厚さによる幾何学的キャパシタンス C_{ig} と、フェルミ準位の変化を表す量子キャパシタンス C_q から構成される。これまで C_{EDL} のみが実験的に評価されていたが、 C_{ig} だけを独立に評価する方法を提案した。MLGとBLG上のIGで C_{ig} を比較し、BLGではMLGよりも C_{ig} が小さくなることを見出した。これは、BLGでは電界が層内部へ侵入し、EDLの有効な厚さが増加するためであり、2DMによる C_{ig} の相違がはじめて実験的に明らかにされた。このように、EDLTの方法を電界印加という観点から2DMへ適用し、その可能性を拡張した点に独自性が見いだされ、本研究が起点となり2DMにおける新たな現象や機能性が見出されることが期待される。論文発表会では多くの話題を端的に説明するとともに適切に質疑に応答したため、得られた研究結果について理論的な側面を含めた深い洞察によって適切に理解したといえる。これらの点より、Zhi Lei君の学位論文は博士（理学）に値すると判断し、最終試験の結果を合とした。