

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学
国立大学法人 東京大学大学院工学系研究科

原子層物質半導体への効率的電子注入方法の発見

～層間積層構造に捻りを入れることで選択的電子注入が生じる～

研究成果のポイント

1. 原子層物質半導体は原子数個分の厚みからなる2次元の半導体です。その半導体の電子の流れを制御する技術を開発しました。
2. 積層構造を有する原子層物質半導体の各層を互いに捻るだけで、電子の空間分布を制御する方法を提案し、その物理的機構を明らかにしました。
3. 新たな半導体技術の進展に大きく寄与することが期待される成果です。

国立大学法人筑波大学数理物質系の丸山実那助教、岡田晋教授、東京大学大学院工学系研究科の長汐晃輔准教授の共同研究グループは、2次元原子層物質^{注1)}である二硫化モリブデン薄膜を用いた電界効果トランジスタ^{注2)}において、外部電界と二硫化モリブデン層間の積層構造を活用することにより、半導体中の蓄積電子の空間分布を自在に制御できることを明らかにしました。量子論に立脚した計算物質科学の手法(シミュレーション)を用いた成果です。

二硫化モリブデンやグラフェン等の2次元原子層物質は、次世代電子デバイス材料として注目を集めています。このようなデバイス中においては、2次元的な原子間の結合形状に起因する安定で平滑な2次元電子系が利点となります。他方、原子層状物質を保持する基板や絶縁膜との界面における半導体特製の低下が問題となっています。

今回、共同研究グループは、二重ゲートトランジスタ^{注3)}中の二硫化モリブデン薄膜への電子注入について、二硫化モリブデン層を互いに捻って積層させることにより、片方の層への選択的な電子注入が可能であることを理論的に示しました。これにより、片方の層を電子伝導層に対する保護層として用いることが可能となり、基板や絶縁膜による原子層物質半導体の半導体特性低下を抑えることが可能となります。

本研究の成果は、2020年4月21日付けの「ACS Applied Electronic Materials」でオンライン公開されました。

* 本研究は、筑波大学研究基盤支援プログラム(S)、日本学術振興会(JSPS)科学研究費補助金17H01069, 16H00898, 16H06331、科学技術振興事業団CREST JPMJCR1532, JPMJCR1715によって実施されました。

研究の背景

遷移金属カルコゲン化合物^{注4)}やグラフェン等の2次元原子層物質は、その形状や電子的な特性から種々の機能性デバイスへの応用が期待されています。特に、完全に閉じた2次元的な原子結合ネットワーク上に広がる2次元の電子系を用いることにより、半導体電子デバイスの機能特性を向上させることが期待されています。

二硫化モリブデンは代表的な原子層状の遷移金属カルコゲン化合物の一つです。これまでに、単層ならびに薄膜状態での二硫化モリブデンを用いた半導体デバイスが作成され、その動作報告がなされてきました。しかし、デバイス中での電荷分布は明らかになっていませんでした。さらに、ゲート絶縁膜^{注5)}表面に存在する不純物が、二硫化モリブデン上を流れる電流を阻害するためによる半導体特性の低下も問題となっています。

そのため、電界効果により原子層状物質積層系に蓄積される電子分布の解明と、それに基づいた半導体特性低下を抑制する方法の開発が望まれていました。

研究内容と成果

本共同研究グループは、量子論に立脚した計算物質科学の手法を用いて、二重ゲート電極を持つ二硫化モリブデン薄膜半導体のゲート電界印加下での電子物性のシミュレーションを行いました。(図1a)ここでは、結晶方位^{注6)}を揃えて積層した2層二硫化モリブデンと、結晶方位を捻って積層した2層二硫化モリブデンに着目し、電界が誘起する電荷分布に対する、二硫化モリブデン層の積層配向と電界強度の影響を調べました。(図1b,1c)

シミュレーションの結果、強電界印加下で弱く電荷が注入された、捻り積層2層二硫化モリブデンにおいて、85%の電荷が片層に局在することが明らかになりました。(図2)他方、配向が揃った2層二硫化モリブデンにおいては、そのような電荷の局在現象はみられず、2層全体に広がった電荷分布が見られました。

今後の展開

捻り積層2層二硫化モリブデンにおいて見出された電荷の局在現象は、二硫化モリブデン薄膜内の一部の層にのみ電荷を注入し、それを伝導チャンネルとして用いることが可能であることを示唆しています。すなわち、電荷の少ない二硫化モリブデン層を伝導層に対する保護膜として用いることにより、二硫化モリブデン薄膜において安定な半導体特性が実現可能であることを予言しました。これにより、二硫化モリブデンをはじめとする遷移金属カルコゲン化合物を用いた半導体技術の著しい向上が期待されます。

参考図

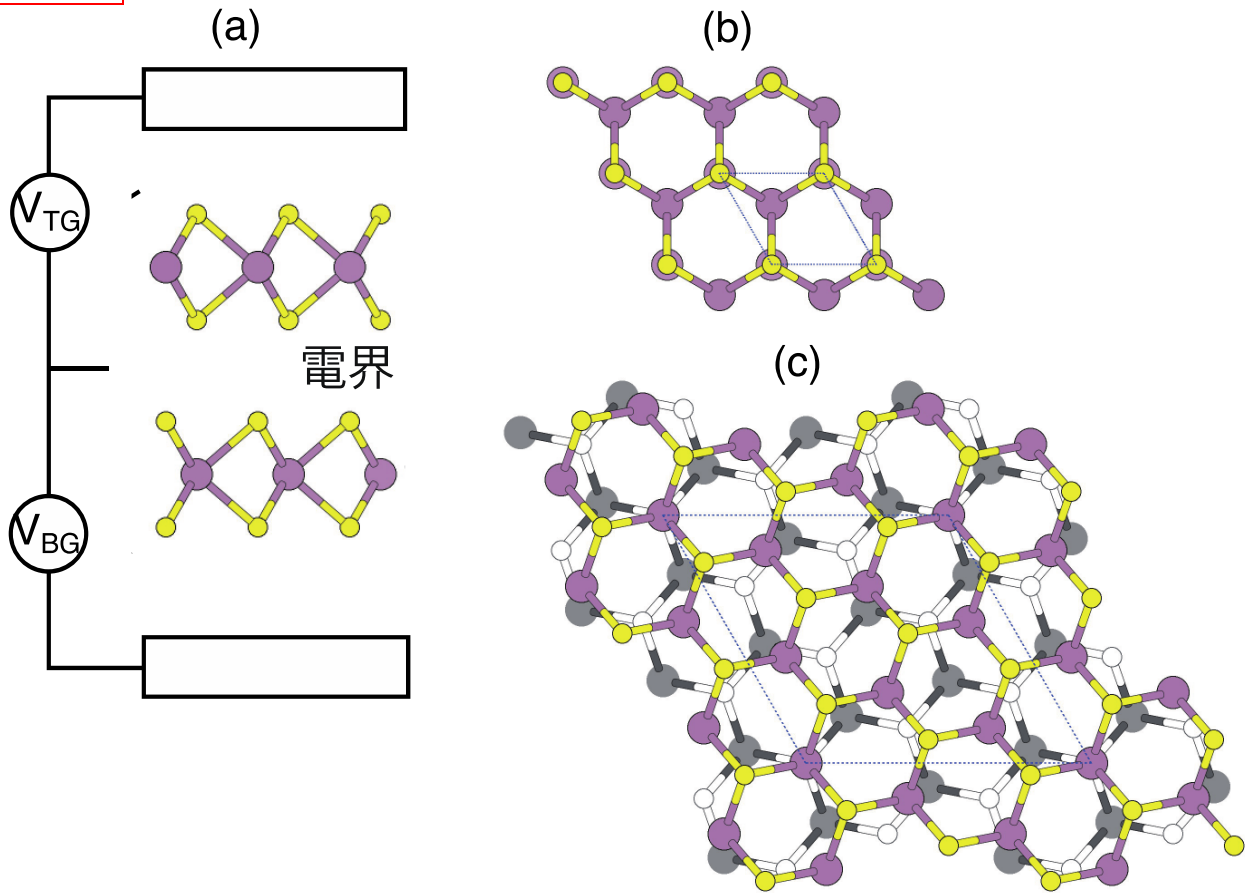


図1(a)二重ゲート2層二硫化モリブデン薄膜半導体の模式図。(b)揃った積層構造と(b)捻った積層構造。黄色(白色)が硫黄原子、紫(灰色)はモリブデン原子を表す。

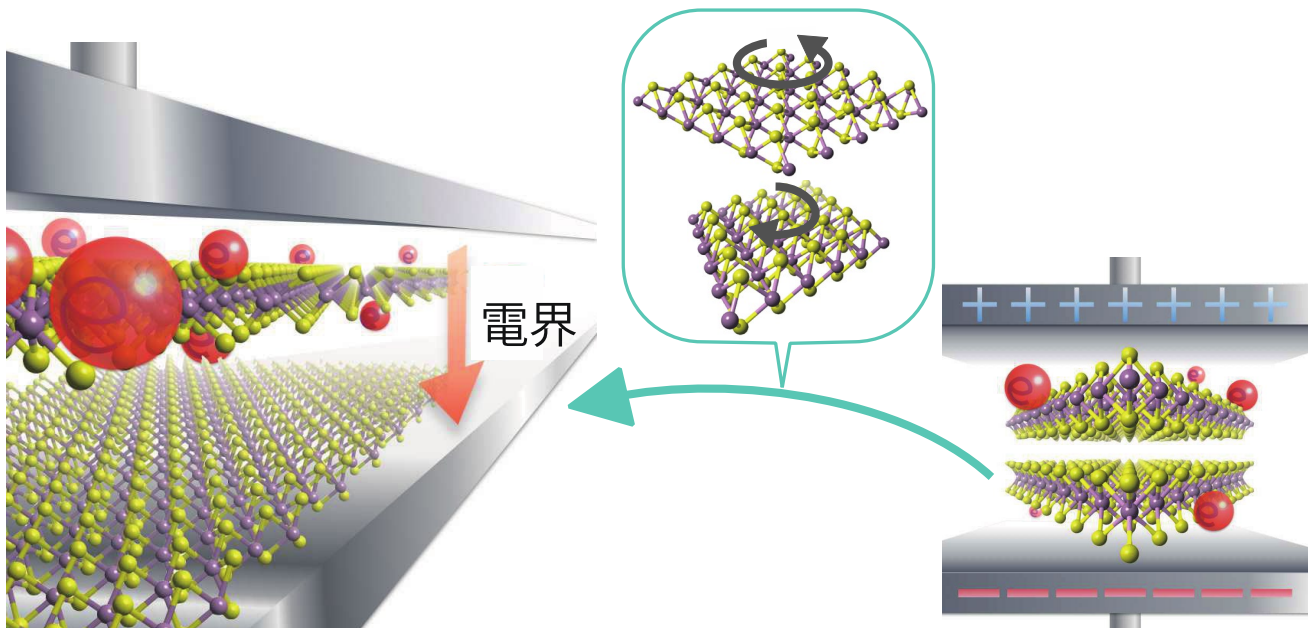


図2層間配向を捻ることにより生じる電荷集中現象の模式図。右がそろった配向、左が捻った配向。赤い球が電荷を表す。

用語解説

注1) 2次元原子層物質

原子1個もしくは数個分の厚さのみからなる2次元の結晶。一般に結晶面内において原子間の強い結合を有し、面鉛直方向には極めて化学的に不活性な物質。炭素原子からなるグラフェンはその代表的な例。

注2) 電界効果トランジスタ

外部電界により電流の流れを制御するトランジスタ。

注3) 二重ゲート半導体

半導体の上下に電荷と電界を制御する電極が配置された半導体。

注4) 遷移金属カルコゲン化合物

遷移金属(モリブデン、タングステン、タンタル)とカルコゲン(硫黄、セレン)でできた原子3個分からなる2次元原子層物質。通常、半導体的な電子特性を有する。

注5) ゲート絶縁膜

ゲート電極と半導体の間の絶縁を司る厚さ数~数十nmの絶縁体。

注6) 結晶方位

原子層物質内における原子の周期的な並びの方向を表す向き。図1(b)の近接する紫色の球間を結ぶ線分に対応する。

掲載論文

【題名】Influence of interlayer stacking on gate-induced carrier accumulation in bilayer MoS₂

(2層二硫化モリブデンへの電界効果キャリア注入における積層構造の影響)

DOI:10.1021/acsaelm.0c00139

【著者名】 Mina Maruyama, Kosuke Nagashio, Susumu Okada

【掲載誌】 ACS Applied Electronic Materials

問い合わせ先

丸山 実那(まるやま みな)

筑波大学 数理物質系 助教

長汐 晃輔(ながしお こうすけ)

東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 准教授