



二次元半導体ゲルマナンで高移動度のトランジスタを実現 - 次世代の層状半導体トランジスタの実現に道 -

1. 発表者：

片山 裕美子（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 助教）
山内 遼斗（研究当時：東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 大学院生）
上野 和紀（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 准教授）
安武 祐輔（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 助教）
深津 晋（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ゲルマニウムを二次元シート状にして水素終端した構造をもつ層状半導体ゲルマナンを用いて p 型、n 型の両側で動作するトランジスタを開発した。
- ◆ゲルマナンの電子移動度が 200 K で $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、20 K で $6,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と、単結晶のシリコン、ゲルマニウムに近い高い値を持つことを初めて明らかにした。
- ◆次世代の半導体として注目されるグラフェンをはじめとする層状半導体の中で、本成果はゲルマナンが広いバンドギャップと高い電子移動度、両側動作のトランジスタ特性を併せ持つことを明らかにし、ゲルマナンがスイッチングデバイス用の半導体として高いポテンシャルを持つことを示した。

3. 発表概要：

原子が二次元状に並んだシートが積み重なった構造をもつ層状物質は、印刷可能な半導体デバイスやフレキシブルなトランジスタなどへの応用が期待される物質である。ゲルマナンは半導体として広く使われるゲルマニウム原子を層状に並べ、水素を添加して安定化した物質であり、理論計算から高性能なトランジスタが実現できると予想されてきた。東京大学大学院総合文化研究科の上野和紀准教授らのグループと深津晋教授らのグループは、共同でゲルマナン単結晶を用いたトランジスタを開発し、p 型、n 型の両側トランジスタ動作を初めて観測した。さらに、電気伝導を担う伝導キャリアが電子の時には移動度が $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ から $6,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ とバンドギャップの広い層状物質としては高い、シリコン単結晶に近い値が得られた。本研究ではゲルマナンをエピタキシャル薄膜として作成し、その上にイオン液体をゲートとした電気二重層トランジスタを作成した。薄膜の高い品質と、半導体・絶縁体界面の欠陥に影響されにくいデバイス構造が高移動度への鍵になったと考えられる。本研究で得られた高品質のゲルマナン薄膜をさまざまな基板へ転写するなどの応用技術を進めることで、層状物質を用いてシリコントランジスタに並ぶ性能を持つトランジスタが実現できると期待される。

4. 発表内容：

グラフェンや MoS_2 などの層状物質は原子が二次元のシート状にならび、そのシートが積み重なった構造を持つ。層状物質は原子 1 層～数層の厚さで剥がすことができ、さまざまな基板材の上に貼り付けることで大面積の単結晶を容易に作るができる。また、剥がした状態でも元の半導体としての性質を保つため、印刷可能な半導体デバイスや機能性デバイスとしての応用が期待される。一方、グラフェンはバンドギャップがゼロであるために半導体としての応

用が限られており、 MoS_2 などの遷移金属化合物はバンドギャップは広いものの、移動度は数百 cm^2/Vs 程度と小さいためにトランジスタのようなスイッチ素子としての応用は難しい。そのため、バンドギャップが広く、移動度が高い層状物質の半導体が求められている。

グラフェンはダイヤモンドと同じ炭素原子から構成された層状物質である。同様に、半導体として広く使われるシリコンやゲルマニウムをグラフェンと同じ構造にしたシリセン、ゲルマネンという物質がある。これらの物質は空气中で不安定だが、ゲルマネンに水素を添加して化学的に安定化したゲルマナンが最近開発され、大面積の単結晶を剥離できること、理論計算から半導体としての性能を示す電子移動度が室温で $18,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ とゲルマニウム単結晶より大きいと予測されること、バンドギャップも 1.6 eV と広いことなどから、半導体デバイスとしての応用が期待されている。実際、ゲルマナンの剥片を電界効果トランジスタ FET として動作させた報告もあるが、この報告では電気伝導を担う伝導キャリアはホールであり、移動度は室温でわずか $70 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ でしかなかった。

東京大学大学院総合文化研究科の上野和紀准教授らのグループと深津晋教授らのグループは、共同でゲルマナン単結晶を用いたトランジスタを開発し、層状物質で典型的に得られる p 型、n 型の両側トランジスタ動作を得た。従来の研究ではゲルマナンは数ミリの大きさの単結晶を細かく砕いて剥片にし、それをシリコン基板などの上に張り付けてデバイス開発が行われてきた。それに対し、本研究ではゲルマニウム単結晶の上に分子線エピタキシー法を用いて薄膜として前駆体である CaGe 単結晶を作成し、塩酸で処理することで剥片でなく数百 nm の厚さをもつ薄膜としてゲルマナン単結晶を作成した。透過型電子顕微鏡での観察結果から、ゲルマナンが基板の上に広い範囲で平坦なエピタキシャル薄膜として成長していることがわかった。この薄膜に対してイオン伝導性のイオン液体をゲート絶縁層の代わりに用いる電気二重層トランジスタというデバイスを作成した。一般的な FET は絶縁層と半導体の界面の欠陥によってデバイスの動作が妨げられるとともに半導体の移動度が抑制されることが多いが、電気二重層トランジスタでは固体と液体の界面を使うためにこのような問題が起こりにくい。

作成したデバイスに 240 K で正のゲート電圧を印加すると負の電荷をもつ電子が伝導キャリアとして働き、逆に負のゲート電圧を印加すると正の電荷をもつホールが伝導キャリアをして働き、どちらの電圧でも電流が増幅された。これらの伝導キャリアの符号はホール測定からも確認された。さらに、温度を下げながらホール測定を行うことで伝導キャリアの移動度を評価した。電子の移動度は 200 K で $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度と遷移金属カルコゲナイドより高い値を示した。さらに、温度を下げるとともに移動度は $6,500 \text{ cm}^2/\text{V}$ まで急激に上昇した。この低温での移動度はゲルマニウム単結晶での移動度に比肩するほどの高さである。一方、ホールの移動度は 200 K では $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ とそれほど高くはないものの、既報のゲルマナン剥片を用いた FET よりはずっと高い値を示した。また、低温では電子と同様に上昇し、 $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度に達した。これらの値はゲルマナンのエピタキシャル薄膜が従来の剥片よりも品質が高く、その結果として高い移動度や良好なトランジスタ動作が得られたことを示唆している。

このように本研究ではゲルマナンのエピタキシャル薄膜に電気二重層トランジスタというデバイスを組み合わせることでゲルマナンがトランジスタとして高い性能を持つことを明らかにした。とはいえ、この移動度は理論計算で得られた室温での予想値よりは一桁小さい。本研究で用いたゲルマナン薄膜は数 μm のサイズの粒に覆われていることから粒界によって移動度が抑制されていると考えられ、デバイスを微細化し $1 \mu\text{m}$ 程度の大きさにすることでさらに移動度の向上が見込まれる。また、本研究ではエピタキシャル単結晶として作成した大面積の単結晶をそのまま使用したが、この薄膜を他の基板に転写することができれば、層状物質に特有のフレキシブルで基板材料を選ばないトランジスタが実現できる。こうした応用研究を進める

ことで、層状物質を用いたトランジスタがシリコンやゲルマニウム、GaAsなどの単結晶で作製する最先端のトランジスタに並ぶ性能を持つようになることが期待される。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Applied Physics Letters 誌 Applied Physics Letters」オンライン版

論文タイトル：Ambipolar transistor action of germanane electric double layer transistor

著者：Yumiko Katayama* Ryoto Yamauchi, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, Kazunori Ueno

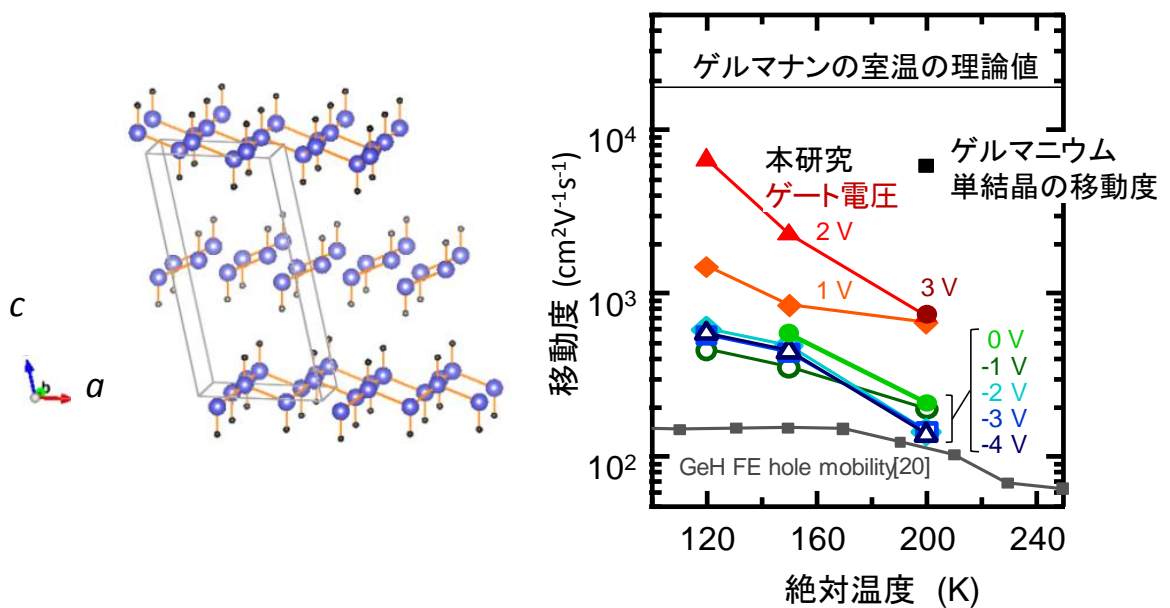
DOI 番号：10.1063/1.5094817

アブストラクト URL：https://doi.org/10.1063/1.5094817

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
准教授 上野 和紀（うえの かずのり）

7. 添付資料：



図(左) 二次元半導体ゲルマナの構造：大きい球で示したゲルマニウム原子がシート状に並び、シートとシートの間には水素原子が配置された構造をとる。

図(右) ゲルマナの移動度の温度依存性：ゲート電圧 $V_G = 2\text{ V}$ の電子伝導の領域で、室温付近では $800\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、低温では $6,500\text{ cm}^2/\text{Vs}$ もの高移動度を示した。また、 $V_G = -2\text{ V}$ のホール伝導の領域でも既報の電界効果トランジスタを4倍上回る $600\text{ cm}^2/\text{Vs}$ の移動度を示した。