

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
一般研究助成 成果報告書

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2026 年 9 月 2 日

氏名 安藤 裕一郎

所属 大阪公立大学大学院工学研究科

職位 教授

1. 申請研究の題目

新規二次元物質の開拓とエレクトロニクス・スピントロニクス応用

2. 研究の目的

2次元物質の代表格であるグラフェンは特異な電子状態（ディラック電子状態）が期待され、理学、工学の両観点で大きな注目を集めてきました。グラフェン研究の成功を契機として、2次元物質の研究は拡がりを見せました。例えば遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)の一部は半導体の特性を示し、単層膜の電気伝導特性（移動度等）はシリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)等の極薄チャネルを凌駕すると期待されています。これらを背景とし、本研究ではごく最近発見され、物性解明が未踏の2次元物質として、14族元素のハニカム2次元物質である14族ポストグラフェン(14PG)およびその終端物質（終端 14PG）に注目しています。グラフェンと類似の原子構造を有していますが、炭素よりも原子番号の大きい14族元素で構成されており、凹凸構造を有しているため、グラフェンにはない新特性が期待されています。しかし、電気伝導特性を含め物性の多くは実験的に未解明です。本研究はこのような“第三世代”の2次元物質の物性を解明し、エレクトロニクス・スピントロニクス応用の可能性を検討することを目的として研究を行いました。

3. 研究の内容

ここでは Ge のハニカム構造に水素原子が終端処理されたゲルマナン(GeH)の結果について報告します。ゲルマナンはバンドギャップが 1.5eV 程度ある直接遷移型半導体であり、高い電子移動度が期待されています。本研究では、CaGe₂単結晶を低温下(−40℃)で塩酸に浸漬して作製した GeH 試料を用いてデバイス作製を行いました。スコッチテープ法による剥離で数 10nm 厚さの多層 GeH フレークを作製し、熱酸化 Si 基板に転写しました。その後、電子線リソグラフィーおよび電子線蒸着を用いた微細加工でトランジスタなどのデバイスを作製しました。デバイス加工後の結晶性は透過型電子顕微鏡および顕微ラマン分光法で評価を行い、電気伝導特性は半導体パラメータアナライザ(ケースレー4200A-SCS)を用いて行いました。

4. 研究の成果と結論、今後の課題

作製したデバイスの光学顕微鏡像を図1(a)に示します。電極を複数本配置することにより、ホール効果測定、2探針測定、4探針測定、トランジスタ動作が同一素子で実施できるようにしました。一例としてホール効果測定の結果を図1(b)に示します。結晶が正方形形状ではないため、電流の均一性が低く、縦抵抗が一部重畳していますが、印加磁界に対し、奇関数のホール電圧信号が検出されました。信号から、作製した GeH は p 型であり、移動度は室温で 15 (cm²/V/s)、低温 (50 K)で 780 (cm²/V/s)であることが分かりました。この移動度は高くはないですが、理論的にも p 型の GeH の移動度は高くないとの理論予測があり、その予測と矛盾しない結果となりました。

た。今後は高い移動度が期待できるn型のGeHの作製を実現する必要があります。次にバックゲートを用いたトランジスタ動作を実証しました。その結果を図1(c)に示します。ゲート電圧によりドレイン電流が大きく変調できており、トランジスタ動作ができていることが分かります。また、ゲート特性からも今回の GeH は p 型半導体であり、電界効果移動度はおよそ $10 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$ 程度であることが分かりました。この結果もホール効果測定と矛盾しない結果が得られております。さらに、GeH 層内の伝導と層間の伝導を評価したところ、前者の伝導度は後者の 2～3 桁程度高く、積層膜でも面内方向の電気伝導が支配的であることも明らかになりました。

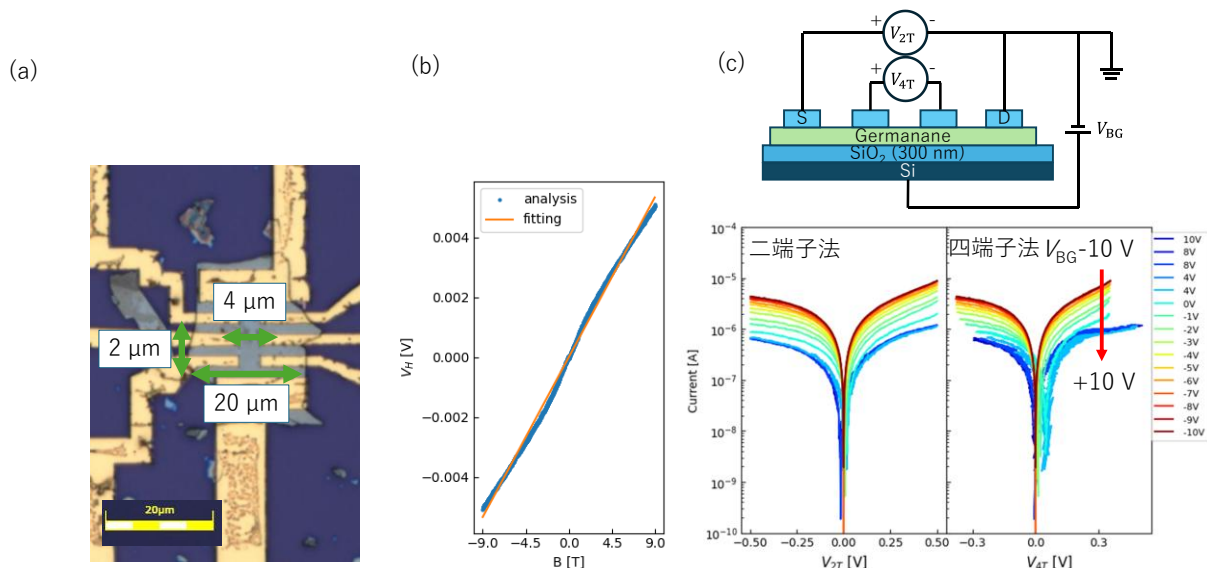


図1. (a) 作製した GeH デバイスの光学顕微鏡像。(b) 室温で測定したホール効果測定の結果。(c) バックゲート型トランジスタによる室温動作。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

GeH などの新規 2 次元物質は全く新しいタイプの半導体材料です。その物性解明では新規物理現象が発見される可能性もあり、学術的意義は極めて高いと考えられます。さらに修飾基を除去した領域ではキャリアの高速移動や無散逸の電荷・スピン輸送が期待されています。これまでは理論研究の範疇でしたが、本研究の発展により、そのような新しい学術領域が開拓できる可能性があります。

5-2. 社会的価値

現在の半導体デバイスの発展は目覚ましいものがあります。トランジスタの構造も大きく変化してきておりますが、次の世代のトランジスタのチャネルは 2 次元半導体が有力視されています。従来のシリコンやゲルマニウムは二次元化が困難であり、最有力候補はTMDCです。しかし構成元素がこれまでの半導体デバイスとは大きく異なるため、様々な課題があります。本対象研究である 14PG の主要元素はゲルマニウムやシリコンであり、既存技術と整合性が高い点が大きな特徴です。14PG も様々な課題がありますが、一つずつ物性を解明し、問題を解決すれば、半導体デバイスに新しい潮流を生み出せる可能性もあり、本研究の社会的意義は極めて高いと考えております。

6. 研究成果

(1) “Circular photogalvanic effect in an inversion-symmetry-broken bilayer germanium nanosheet”

Taiki Nishijima, Ei Shigematsu, Ryo Ohshima, Keigo Matsushita, Akio Ohta, Masaaki Araidai, Junji Yuhara, Masashi Kurosawa, Masashi Shiraishi, Yuichiro Ando
arXiv:2411.13947

現在、学術論文をもう 1 報執筆中です。

以上