

2021 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	固体電解質を用いた空間電荷注入を高圧力下で行う 新奇物性制御
キーワード	① 電界効果、②イオン伝導、③高圧力

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	アダチ シンタロウ 足立 伸太郎
配付時の所属先・職位等 (令和3年4月1日現在)	京都先端科学大学 ナガモリアクチュエータ研究所 助教
現在の所属先・職位等 (令和4年7月1日現在)	京都先端科学大学 ナガモリアクチュエータ研究所 助教
プロフィール	弘前大学理工学研究科博士後期課程修了(博士(理学))後、東京大学物性研究所国際超強磁場科学研究施設及び物質・科学研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)において、ポスドク研究員として超伝導体の結晶合成・育成、強磁場中における電気輸送特性に関わる研究を行ってきた。最近は高圧力下における物質の性質変化に注目している。2020年7月より現職。磁場下における粒子の配向を対象とした基礎・応用研究も行っている。専門分野に関わるキーワード：超伝導、固体物理、強磁場、磁場配向、圧力効果。

1. 研究の概要

本研究では、高圧力を印加することによる物質の性質変化(圧力効果)と、電界を印加することによる物質中のキャリア(電子又は正孔)量制御(電界効果)の技術を融合し、これまでになく広範且つ自由に物質の性質を制御できる手法の開発を目指している。圧力効果では、ギガパスカル(1GPa ≒ 1万気圧以上)オーダーの高圧力を印加することで物質の原子系を変化させ、構造相転移や新奇量子相の誘起を狙っている。圧力効果と合わせて電界効果を使用できるようにすることで Fermi 準位を直接制御し、様々な未知物性へのアクセスを目指す。

2. 研究の動機、目的

本研究計画を立案するにあたって、高圧力下で電界効果を実現するためにはどのようにすれば良いか、という問題設定があった。前文において想定している高圧力下とは、具体的には室温で 2GPa 付近の圧力である。筆者らは、2020 年までにダイヤモンドアンビルセルを圧力発生装置(圧力セルとも言う)としてその試料空間中に電界効果トランジスタ(EDLT)構造を作製することで高圧力下において電界効果を実現できる技術を開発した[Adachi et al., Appl. Phys. Lett. **116**, 223506 (2020).]。この際は、イオン液体を電界効果のための所謂ゲート誘電体として機能させつつ高圧力を発生させるための圧力媒体としても採用した。そのような実験を進めることで、室温では 1.5 GPa 程度までは圧力効果と電界効果を同時使用できることを明らかにした。しかし、1.5 ~ 2 GPa を超えるとイオン液体が固化することでイオン伝導性が消失することにより EDLT 構造による電界効果を使用できないことがわかった。本研究では、さらに高い圧力領域においても電界効果を利用可能とするために、2015 年に Biscaras らが報告[Biscaras et al., Nature Communications **6**, 8826 (2015).]したイオン伝導性を有するガラスを試料基板且つゲート誘電体として用いた電界効果「space charge doping (略称:SCD)」に着目し、こ

のSCDを利用することによって圧力下電界効果の技術を拡張することを目的とした。

Biscaras らが提案した SCD の手法は日本国内で未だあまり知られていないと思われる。図 1 は SCD の概略図である。以下にその概要を要約した。この手法では、試料をホウケイ酸ガラス基板上に設置し、ボトム(基板の裏)側にゲート電極、そしてトップ(試料表面)側にソース電極を付けてゲート-ソース間に電圧を印加するという構造的な特徴がある。ゲート電圧(V_G)を印加すると、ホウケイ酸ガラス基板中で正の電荷を持つナトリウムイオンが試料またはゲート電極側に移動する。これに伴い試料側には電界効果によって多数のキャリアが誘起される。本研究では、試料は半金属ビスマスを用いた。ビスマスは一般的な金属に比べてキャリア密度が極めて小さい[キャリア密度 $N = 2.75 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; Smith et al., Phys. Rev. **135**, A1118 (1964).]ことから、ゲート電圧を極端に大きくしなくてもビスマス薄膜の電気抵抗を容易に制御できると期待した。真空蒸着でガラス基板上にビスマス薄膜(厚さ $\sim 60 \text{ nm}$)を作製し、上述のような SCD 構造のデバイスを完成させ、直流四端子法による電気抵抗のゲート電圧及び時間依存性を室温・常圧力下において測定した。

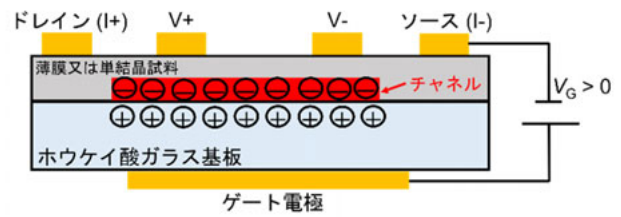


図 1. Space charge doping (SCD)の概略図

3. 研究の結果

図 2(a,b)は、SCD 構造上に作製したビスマス薄膜の電気抵抗(R)の時間変化を示している。図 2(a)に示したように、まず V_G を 1.0 V にすると、すぐには変化が見られなかったが、2 時間程経過してから電気抵抗の明らかな減少を観測した。その後は減少率が小さくなり、8 時間を超えると電気抵抗の値はほぼ一定に収束した。これらの振る舞いは、ゲート電圧の印加によってガラス基板中のナトリウムイオンが移動することにより起こった電界効果である。また、続けて V_G を -1.1 V にすると、図 2(b)に示したように電気抵抗がゆるやかに上昇し、約 20 時間を超えるとその値は飽和した。このように極性を変えても電界効果を観測できた。抵抗値の変化の幅や割合は、ゲート電圧の絶対値や SPD 構造のジオメトリを工夫することによってコントロールできる余地があると考えている。現在は、圧力セル中への SPD 構造の構築を進めており、今後はビスマス薄膜以外の機能性材料にこの手法を適用することで、新奇物性・機能性材料の開発に繋げたい。

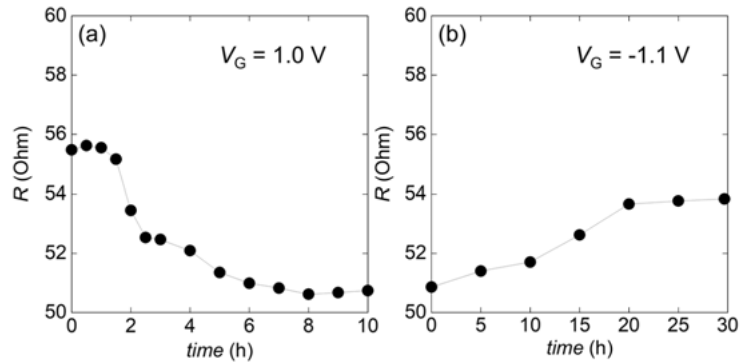


図 2. ビスマス薄膜の電気抵抗(R)の時間変化。ゲート電圧を(a) $V_G = 1.0 \text{ V}$ とした時と、続けて(b) $V_G = -1.1 \text{ V}$ とした時の結果

4. 研究者としてのこれからの展望

筆者が最も注目している研究対象・物質群は超伝導体である。超伝導とは、巨視的量子効果によって電気抵抗がゼロになる等、広範な応用の可能性を秘めた物理現象である。しかし、現在までに発見された超伝導体は室温よりも低温に冷やさなければ超伝導状態にならないため応用例が限られている。この超伝導になる温度が室温以上となる物質・手法の開発を目指す。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

このたびは、本研究課題を採択、ご支援いただき誠にありがとうございました。本奨励金はボトムアップ型の研究を支援して下さるという特徴があるため、研究者としては大変ありがたく心強い存在だと感じております。今後とも、後進の支援を続けていただけますようお願いいたします。あらためまして、このたびご支援いただいた皆さま方に御礼申し上げます。