

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21843

研究課題名（和文）ファンデルワールス結晶ナノ構造体における異常光電流効果の開拓

研究課題名（英文）Anomalous photocurrent response in van der Waals nanostructures

研究代表者

井手上 敏也（Ideue, Toshiya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：90757014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、2次元ファンデルワールス結晶ヘテロ界面において、特徴的な対称性の破れを創出することで、ナノ物質における新奇光起電力機能の開拓を行った。特に、異なる結晶対称性を持つ2次元結晶である二セレン化タングステンと黒リンの界面において、分極および対称性の破れを反映したゼロバイアス下光電流である異常光電流効果が生じることを発見した。また、光電流の詳細な振る舞いを調べて理論計算と比較することにより、観測された現象が、光励起過程において波動関数の重心がシフトすることで生じる量子力学的効果によって上手く説明できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ファンデルワールス結晶ナノ構造における特徴的対称性に着目したユニークな研究であり、見出した対称性制御の方法は、様々なナノ構造に広く適応可能な手法である。今後、本成果を契機としたナノ物質における対称性制御を基軸とした物性や機能性開拓への新展開が期待される。また、観測した光電流の密度は、これまで報告されていた異常光電流効果に比べて大きく、ナノ物質の対称性や構造、物質の組み合わせを上手く設計することにより、効率的な太陽電池を開発できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Novel photovoltaic property was explored in symmetry engineered van der Waals nanostructures. We found that in-plane electronic polarization and anomalous photocurrent response reflecting the polar structure can appear at the interface of two dimensional tungsten disulfide and black phosphorus, which have different crystal symmetries. By studying the detailed behaviors of photocurrent and comparing them with theoretical calculations, we clarified that observed photocurrent response can be explained by a quantum-mechanical shift current. The present results offer a simple guideline for symmetry engineering applicable to a variety of van der Waals interfaces. Improvement of power generation efficiency by optimization of material combination and device structure will be also expected.

研究分野：物性物理学

キーワード：異常光電流効果 シフトカレント ファンデルワールス結晶 ファンデルワールスヘテロ界面 空間反転対称性の破れ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) ファンデルワールス結晶は単層に剥離したり、ナノチューブやヘテロ界面といったナノ構造を作製したりすることによって多種多様な空間反転対称性の破れを実現できる。
- (2) そのようにファンデルワールス結晶ナノ構造の対称性を制御することで、空間反転対称性の破れを反映した輸送現象、特に、光を照射した際に半導体 $p-n$ 接合が無いにも関わらず対称性の破れを反映した光電流がゼロバイアス下で流れる、異常光電流効果の発現が期待される。
- (3) しかしながら、ファンデルワールスナノ構造体における異常光電流効果の研究は報告が少なく、限られていた。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では、ナノ物質における新奇光機能構築に向けて、結晶エンジニアリングを利用したファンデルワールス結晶ナノ構造体における空間反転対称性の破れの創出と異常光電流効果の観測・機構解明および学理構築を目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 劈開・転写法を用いて異なる対称性を持ったファンデルワールス結晶、特に3回対称性を持つ単層 WSe_2 と2回対称性を有する黒リンのヘテロ界面を作製した。
- (2) 作製したファンデルワールス結晶ヘテロ界面において、対称性の破れを反映した異常光電流効果が生じるか否かを、光電流の方位依存性や照射位置依存性、強度依存性等を測定することにより検証した。
- (3) 観測結果と理論を比較検討することにより、光電流効果の微視的機構や電子状態に関する知見を深めた。

4. 研究成果

(1) 3回回転対称性を持つ結晶と2回回転対称性を有する結晶を、各々が持つ鏡像面が平行になるような角度で積層したファンデルワールス結晶ヘテロ界面では、3回対称性と2回対称性が両立しないため回転対称性が消失し、鏡像面に関する対称性だけが残って、その方向に分極およびそれを反映した異常光電流効果が発現することが期待される(図1)。実際に、3回対称性を持つ WSe_2 および2回対称性を有する黒リンの界面において、デバイスの真中(電極から離れた位置)に光を照射すると、ゼロバイアス下で光電流が流れる様子が観測された(図2)。

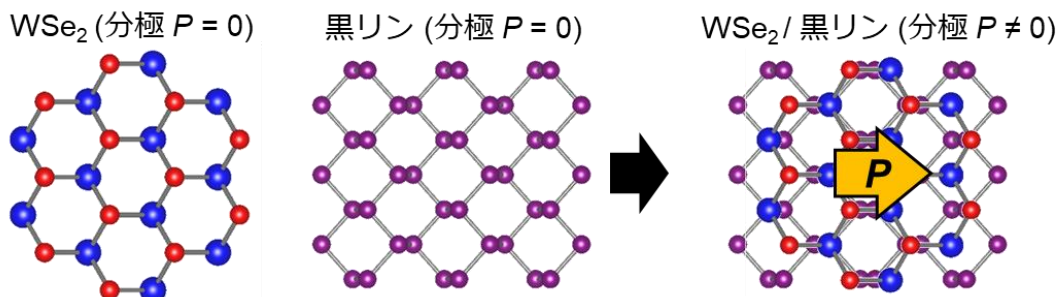


図1. WSe_2 /黒リンファンデルワールス結晶ヘテロ界面における対称性

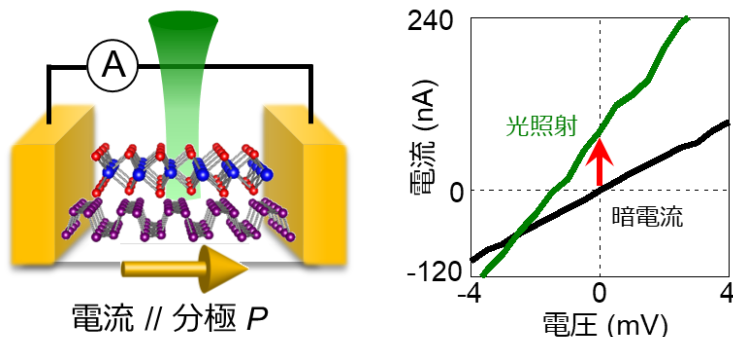


図2. WSe_2 /黒リンファンデルワールス結晶ヘテロ界面におけるバルク光起電力効果の模式図(左)と光照射下電流-電圧特性(右)

(2) そのような電極から離れた位置において生じる光電流効果は、 WSe_2 や黒リンだけのデバイスでは観測されず(図3左、真中)、 WSe_2 /黒リン界面でのみ観測された(図3右)ことから、界面における対称性の低下や特徴的電子状態を反映しているものと考えられる。

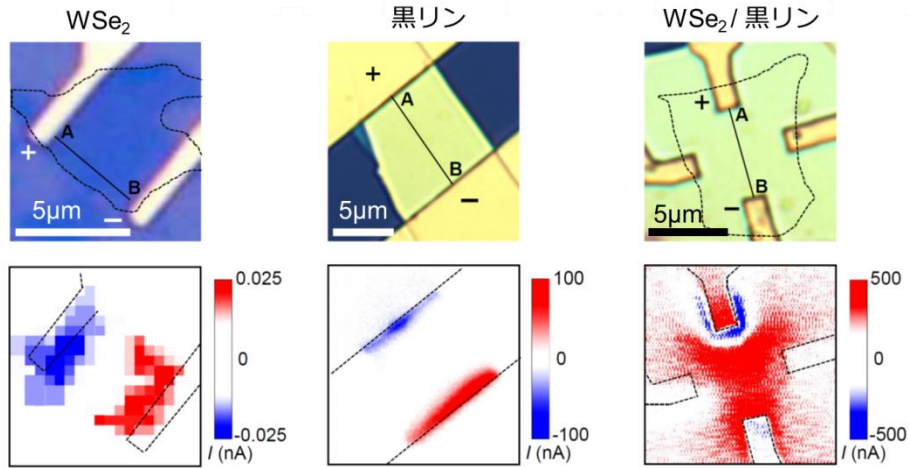


図 3. WSe_2 (左)、黒リン (真中)、 WSe_2 /黒リン界面 (右) における光電流の光照射位置依存性

(3) また、 WSe_2 /黒リン界面における異常光電流効果は、分極の発現が期待される両物質の鏡像面に平行な方向にのみ観測され、それと垂直な方向には小さいことが確認された (図 4)。このことは、光電流効果が界面の分極に由来することを示唆している。

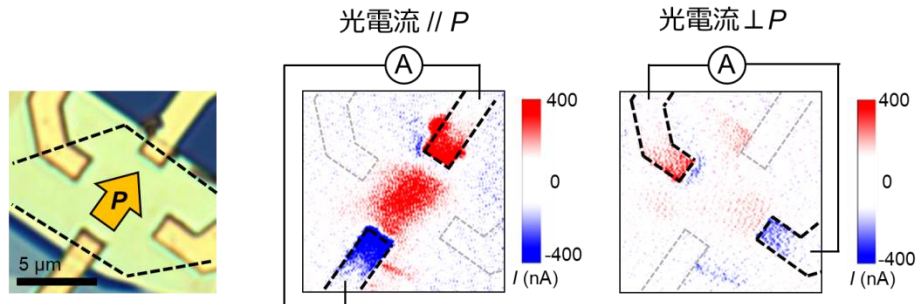


図 4. WSe_2 /黒リン界面デバイス写真 (左) と異なる電極対を流れる自発的な光電流の光照射位置依存性 (中央、右)。分極と平行な方向には、電極から離れた位置に光を照射した場合に光電流が流れるが、分極と垂直な方向には、そのような振る舞いは観測されない。

(4) さらに、光電流の照射光エネルギー依存性を測定し、電子状態の詳細や異常光電流効果の起源に関して考察を深めた。その結果、光電流が WSe_2 の励起子共鳴近傍のエネルギー領域 (1.6 eV, 2 eV 付近) で増大することを観測し (図 5 左)、2 次元励起子共鳴によってファンデルワールス結晶ヘテロ界面の異常光電流効果が増大する可能性を見出した。さらに、励起子共鳴よりも高エネルギー (2.2 eV 以上) の領域において、バルク光起電力効果が非単調に振舞うことを発見し、理論グループとの共同研究を行うことで、この振る舞いが、光励起において波動関数の重心がシフトすることによって生じる量子力学的光起電力効果 (シフト電流機構) によって上手く説明できることを明らかにした (図 5 右)。

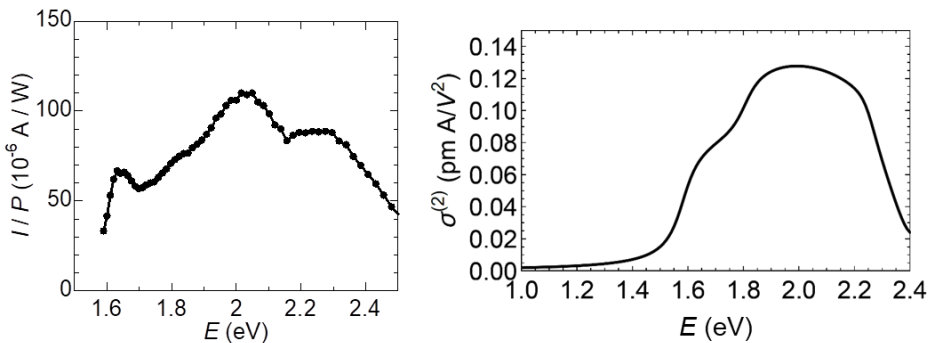


図 5. WSe_2 /黒リンファンデルワールス結晶ヘテロ界面におけるバルク光起電力効果の照射光エネルギー依存性 (実験: 左、理論計算: 右)

(5) 以上の結果は、ファンデルワールス結晶ヘテロ界面において対称性を制御することによって、光電流機能性を増大できることを意味しており、今後、様々なファンデルワールス結晶ヘテロ構造に広く適応可能な手法であると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Akamatsu, T. Ideue, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Laurienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, and Y. Iwasa	4. 巻 372
2. 論文標題 A van der Waals interface that creates in-plane polarization and a spontaneous photovoltaic effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 68-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.aaz9146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Ideue, and Y. Iwasa	4. 巻 12
2. 論文標題 Symmetry Breaking and Nonlinear Electric Transport in van der Waals Nanostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annual Review of Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 201-223
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1146/annurev-conmatphys-060220-100347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 12件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Anomalous photovoltaic effect in noncentrosymmetric van der Waals nanostructures
3. 学会等名 Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井手上敏也
2. 発表標題 固体中の反転対称性の破れと非線形量子輸送現象
3. 学会等名 ISSPワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiya Ideue
2. 発表標題 Bulk photovoltaic effect in van der Waals heterointerfaces
3. 学会等名 International Meeting on Thin Film Interfaces and Composite Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	南京大学			
カナダ	ブリティッシュコロンビア大学			