

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02619

研究課題名（和文）アモルファス由来ファンデルワールス層状物質の結晶化機構の解明

研究課題名（英文）Understanding the crystallization mechanism of amorphous van der Waals layered materials

研究代表者

Fons Paul (FONS, Paul)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：90357880

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、層状カルコゲナイドにおける構造的な特徴に着目し、三次元的な結合を有するアモルファスからの結合の次元が変化する結晶化メカニズムの解明や、レーザー照射による超高速ダイナミクスの測定、そして、高い配向性を持った層状カルコゲナイド薄膜の成膜技術の開発などを行なった。面内方向と面直方向で高い構造の異方性を有することから、結晶化や超高速現象に特異的な振る舞いが観察された。これらを駆逐することで、高い配向性を持った様々な層状結晶カルコゲナイド薄膜の作製に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、多数の層状カルコゲナイドのアモルファス薄膜の結晶化現象について知見を得ることができた。構造解析や超高速ダイナミクス、高配向成膜といったいくつかの方向性をもって研究を進めてきたが、どの研究についてもその分野における重要な国際誌にて誌上発表することができた。今後物理的な限界を迎えることになるSiエレクトロニクスにおいて、層状物質は究極の微細化を実現できるポテンシャルを秘めており、高い期待が持たれている。本研究で得られた結晶化現象や薄膜形成技術に関する様々な知見は、次世代電子デバイスの実現に大きな貢献をすると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, focusing on the structural features of layered chalcogenides, we have elucidated the crystallization mechanism that changes the dimension of chemical bonding from 3D-amorphous to 2D-crystal, measured ultrafast dynamics under laser irradiation, and developed a deposition technique for highly oriented layered chalcogenide thin films by sputtering. Due to the high structural anisotropy in the in-plane and out-of-plane directions, specific behaviors were observed in crystallization and ultrafast phenomena. By understanding these behaviors, we have succeeded in fabricating various highly oriented layered chalcogenide thin films.

研究分野：材料科学

キーワード：層状カルコゲナイド テルライド 遷移金属ダイカルコゲナイド スパッタリング法 結晶化

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。

## 1. 研究開始当初の背景

ファンデルワールス力という弱い相互作用によって結びついた層状物質が基礎研究、応用研究の観点から非常に注目を集めている。最も有名な例は炭素の一原子層からなるグラフェンであり、この発見をきっかけに様々な層状物質が提案、研究されてきた。その中で、SやSe、Teといったカルコゲン元素を含むカルコゲナイド系の層状物質は、MoTe<sub>2</sub>などの遷移金属ダイカルコゲナイド(Transition Metal Dichalcogenides: TMDs)や、Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>などに代表されるトポロジカル絶縁体として特異な物性を示す。これら層状物質は組成によって半導体的特性を示し、グラフェンには存在しないバンドギャップを有するだけでなく、原子層レベルまで薄くしても機能が損なわれないため、次世代のエレクトロニクスを担う新規電子材料として幅広い分野で注目を集めている。

このように、非常に興味深い物性を示す層状カルコゲナイドだが、産業応用には、大面積かつ高品質な膜を低コストで形成できる製造方法の実現が不可欠である。これまでの研究の多くは、バルク単結晶を作製し、テープによって剥離することで試料を得ていたが(剥離法)、 $\mu\text{m}$ サイズの試料は研究レベルでしか使えず、このようなトップダウン式的手法では応用展開の観点から限界があるのは明らかである。一方最近では、ボトムアップ式的手法として化学気相蒸着法(CVD)による基板材料への広範囲成膜も試みられている。しかし現状では、膜の結晶性が乏しく(欠陥が多く、低配向性)、材料の電気物性を最大限に活かしてきれていないといった課題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、スパッタリング法によってまずアモルファス薄膜を得てから、熱処理結晶化することで高い配向結晶膜を作製する手法を開発するとともに、結晶化のメカニズムについて原子レベルの構造変化を解析することで現象論的に理解することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、アモルファスからの結晶化現象の解明や、高配向結晶膜の成長についてはスパッタリング法にて数十 nm の薄膜試料を作製した。また、超高速現象の解明には単結晶のバルク試料を用いた。結晶化のメカニズム解明には、実験室の分析装置(X線回折法(XRD)やラマン分光法)に加え、SPring-8の放射光施設においてX線吸収分光法(XAFS)を行なった。超高速現象は、フェムト秒レーザーを用いたポンプ-プローブ法にて測定を行なった。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

#### ① 層状カルコゲナイドの結晶化メカニズムの解明

はじめに、層状カルコゲナイドのアモルファス相の結晶化挙動の結果について示す。結晶相が層状構造を有する物質も、スパッタ法といった熱力学的な非平衡プロセスにて作製された場合、アモルファス相を呈する。アモルファス相は原子配置に長距離秩序を持たない、いわゆるランダムな構造であるため、三次元的に等方的な構造と見なすことができる。Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>はアモルファス-結晶間を可逆的に相変化でき、電気抵抗差によって不揮発メモリ応用が可能な材料である。また、単層の結晶でも70K以下で強磁性を示すことから、もっとも薄い磁石の一つとしても知られる。本研究では、スパッタ法によって作製したアモルファス Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> 薄膜を、様々な温度で熱処理し XRD や XAFS によって構造解析した。図 1(a) は、250、290、330°C で熱処理した Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> 薄膜の XRD および Te-K 吸収端のスペクトルである。250°C では XRD ピークをもたないアモル

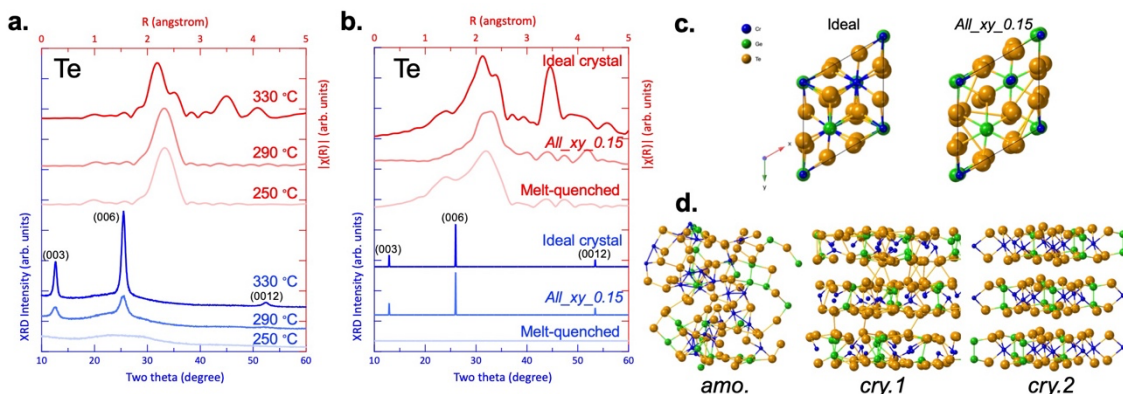


図 1. (a) Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> 薄膜の各温度熱処理後の XRD と Te-K 吸収端。(b) Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> のアモルファスモデル、理想結晶モデルと面内方向ランダム変位モデル(All\_xy\_0.15)。(c) c 軸から観察した理想結晶と面内方向ランダム変位モデル。(d) アモルファスから擬似的な結晶(cry.1)を経由した結晶化。

ァス、XAFS もシングルピークのみで、短距離的な秩序しか持たないことを示している。330°Cでは、明瞭な XRD ピークと第二近接に対応する XAFS ピークが観察されていることから、試料は結晶相になっていることがわかった。その間の 290°Cでは、XRD ピークはあるものの(=結晶的)、XAFS はアモルファス的であることがわかった。このような、長距離的(数 nm 以上)には秩序があるが、中距離的(1nm 程度)には秩序を持たないという、一見奇妙な原子配置をしていることがわかった。その原因を突き止める目的で、第一原理計算によるシミュレーションによって、結晶、アモルファスモデルを作製した。XRD と XAFS のスペクトルを計算した結果、それぞれ 330°C、250°Cの実験結果を再現するものとなった。290°Cの結果を再現するモデルとして、最も実験結果に近いものは、理想的な層状結晶構造から、各原子を x-y 面内でランダムに変位させたものであった。このモデルでは、z 軸方向(層に垂直方向)には原子面は結晶構造通りに並んでいるが、面内方向には規則性は無い。この場合、XRD(面直方向の回折面を測定)ではピークは出て良いが、面内方向にランダムな原子配置であるため、XAFS による局所構造としては第一近接原子間のピークしか出ないことが説明された。このように、三次元的なアモルファスが、二次元的に結合した層状結晶へと変化する場合、擬似的な層状構造を経ることで結合の次元を変化させていくことを明らかにした。本研究結果は、Scientific Reports, 11, 4782 (2021)に出版された。

代表的な遷移金属ダイカルコゲナイドである  $\text{MoS}_2$  のアモルファス膜の結晶化挙動についても研究を行なった。XRD や XAFS、X 線光電子分光法(XPS)と第一原理計算を組み合わせることで、 $\text{MoS}_2$  薄膜は始め  $1\text{T}'$  という準安定結晶相へと構造変化し、その後、熱処理時間を長くすることで  $2\text{H}$  構造へと変化していくことがわかった。 $1\text{T}'$  の方が  $2\text{H}$  相よりも対称性が低く、ランダムなアモルファス相からの結晶化では、より構造類似性のある結晶相へと相変化することを示唆する結果である(ACS Applied Nano Materials, 4, 8834 (2021))。また、S 組成が多い  $\text{MoS}_4$  のアモルファス薄膜の結晶化挙動を調査した結果、 $\text{MoS}_2$  アモルファスから結晶化させるよりも高い配向性を得ることに成功した。これは、S 量が多いと Mo の配位数が通常の 6 ではなく 4 程度の値となり、加熱中の S 原子の緩やかな排出によってより layer-by-layer の成長が促進されたためだと考えられた(Crystal Growth & Design, 22, 3072 (2022))。

最後に、同じく遷移金属ダイカルコゲナイドである  $\text{MoTe}_2$  に関して、アモルファス薄膜の結晶化過程を調査し、熱処理による構造変化を詳細に解析した。現在、論文を投稿し、査読対応中である。

以上のように、 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoTe}_2$  といったさまざまな層状カルコゲナイドのアモルファス膜の結晶化挙動について調査し、様々な知見を得ることができた。

## ② $\text{MoTe}_2$ における超高速現象

層状物質のように、面内方向と面直方向で大きな構造異方性が存在する場合、その格子ダイナミクスは特異的な振る舞いをする可能性がある。また、遷移金属ダイカルコゲナイドは構造多形を複数持つものが多く、レーザー照射による光誘起相転移も期待できる。本研究では、 $\text{MoTe}_2$  単結晶におけるフォノンダイナミクスをフェムト秒レーザーによるポンプ-プローブ法によって明らかにした。

$1\text{T}'$ - $\text{MoTe}_2$  単結晶におけるコヒーレントフォノン測定を行なった結果、通常観察されない面内方向のせん断モードに対応するスペクトルが観察された。これは低温安定相の  $\text{Td}'$  相に由来するピークと考えられ、超高速レーザー照射による  $1\text{T}'$ - $\text{Td}'$  変化を示唆する結果であることを明らかにした(Applied Physics Letters, 116, 093103 (2020))。

$2\text{H}$ - $\text{MoTe}_2$  単結晶におけるコヒーレントフォノン測定も行い、レーザーによって励起されたキャリアと格子との非平衡ダイナミクスについて明らかにし、現在、論文投稿、査読対応中である。

最後に、レーザー照射による光誘起相転移を試みた結果について説明する。 $2\text{H}$  および  $1\text{T}'$ - $\text{MoTe}_2$  単結晶にレーザーを照射し、その前後でコヒーレントフォノン測定を行なった。図 2 に示すように、レーザー照射後、Te の  $A_1$  モードに対応するピークが顕著に現れた。光学顕微鏡観察の結果、レーザー照射箇所にはダメージが観察された。これはレーザー照射の加熱によって Te が相分離、析出したことを示唆する結果である。Te 系カルコゲナイドでは、レーザーによる Te 析出はよく観察される現象であり、本実験でも同様の結果となったと考えられる(Physica Status Solidi Rapid Research Letters, 2100633 (2022))。一方で、 $\text{SiO}_2$  などの保護膜を成膜することで Te 析出を抑制できる予備実験結果も得られており、今後、レーザー照射による光誘起相転移の実現に向けて知見が得られつつある。

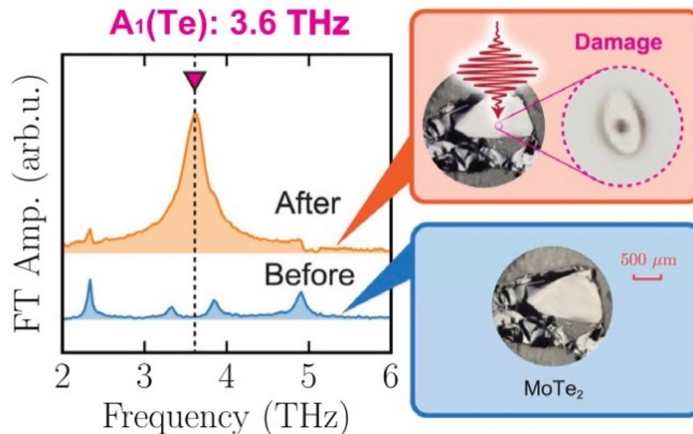


図 2.  $\text{MoTe}_2$  単結晶のコヒーレントフォノンスペクトルのフーリエ変換。レーザー照射ダメージ前後のスペクトル。

### ③高配向層状カルコゲナイド薄膜の作製

層状カルコゲナイドのアモルファスからの結晶化挙動を解明する中で、熱処理や作製プロセス条件によって、高い配向性を有する層状薄膜がスパッタ法にて得られることがわかってきた。そこで、最後に高い配向性を持った層状カルコゲナイド薄膜の作製について得られた結果を示す。そもそも層状物質は、多様な機能性を有し、原子層厚でも機能が損なわれないため、次世代エレクトロニクスにおいて非常に期待が持たれている一方で、その機能を発現するべく、高い結晶性を維持したまま大面積に作製する必要がある。本研究で一貫して用いてきたスパッタ法は、大面積成膜を得意とするが、膜質の課題を抱えていた。本研究では、一例として、次世代不揮発性メモリとして注目されている相変化メモリに使われる相変化材料、具体的には  $\text{GeTe}$  や  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  といったカルコゲナイドの高配向成膜について実験を行なった。

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  は光ディスクにも用いられている材料で、アモルファスと無配向の多結晶間の相変化を利用している。図 3(a) に様々な条件で作製した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  結晶薄膜の XRD 結果を示す。A は室温で 50nm 成膜し、その後 230°C で熱処理結晶化させたものである。ピーク位置を見ると、粉末パターンに対応する傾向が見られ、無配向の多結晶膜であることがわかった。これは、上述した光ディスクと同じ傾向である。次に、B に示すのが、室温で 3nm 成膜後、230°C に加熱してから 47nm 成膜した試料である。A の結果と異なり、005 と 0010 という層が基板に平行に並んだ、いわゆる配向性を持った膜になっていることがわかった。これは、高温成膜によって配向結晶化が促進されたこと示唆する結果であった。一方で、ピーク強度はそこまで大きいわけではなく、配向はしたものの、結晶粒径はそこまで大きくなく、結晶性としては不十分であることもわかった。これは、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  の場合、230°C 熱処理では NaCl 構造を持つ準安定結晶相となるため、高温成膜時の下地層としては高配向化にあまり貢献しないためであると考えられる。C の結果は、室温 3nm の下地層として  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  を成膜後、同様に 230°C まで加熱し、残りの  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  を 47nm 成膜したものである。 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  は層状構造で高い配向性を持った結晶になりやすく、また結晶化温度も 100°C 程度であるので、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  の成膜温度の 230°C では十分結晶化が完了していると考えられる。さらに、 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の (001) の終端面は六回対称となっており、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  の結晶構造と同じであることから、テンプレートとしての役割が期待できる。図 3(a)C に示すように、他の条件と比べても桁違いのピーク強度であることがわかった。

本手法を適用することで、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  を含む  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  の擬二元合金薄膜についても、高い配向性を持たせたまま成膜できることを明らかにした。図 3(b) は、組成の異なる  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  薄膜の XRD 結果である。どの試料も高い配向性を有していることがわかる。ピーク位置が組成によってシフトするのは、(c) に示すように面間隔がわずかに異なるためである。これらの結果については、Materials Science for Semiconductor Processing, 135, 106079 (2021) にてレビュー論文として出版された。

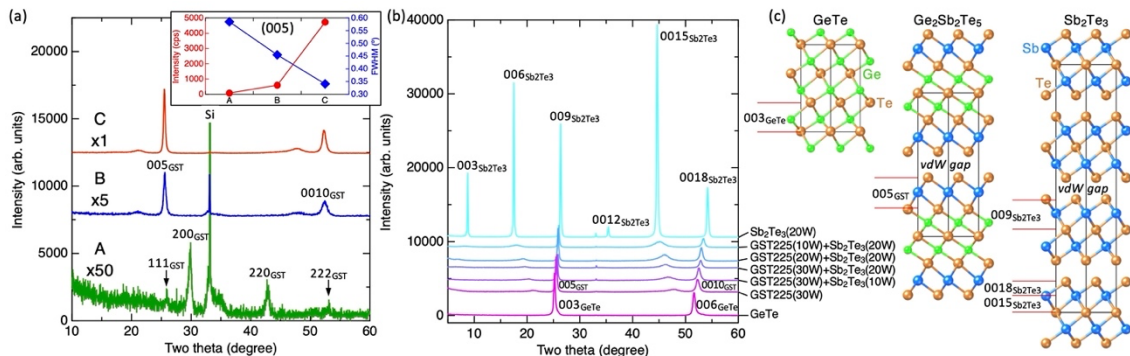


図 3. (a) 室温で 50nm 成膜し、230°C で熱処理した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  薄膜(A)、室温で 3nm 成膜し、230°C で 47nm 成膜した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  薄膜(B) 室温で 3nm、 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  を成膜し、230°C で 47nm 成膜した  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  薄膜(C)。(b) 組成の異なる高配向  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$  擬二元薄膜。(c)  $\text{GeTe}$ 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 、 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の結晶構造。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究によって、多数の層状カルコゲナイドのアモルファス薄膜の結晶化現象について知見を得ることができた。構造解析や超高速ダイナミクス、高配向成膜といったいくつかの方向性をもって研究を進めてきたが、どの研究についてもその分野における重要な国際誌にて誌上発表することができた。レビュー論文として Materials Science in Semiconductor Processing, 135, 106079 (2021) に掲載された論文は、Most Downloaded Article にも選出され、国内外において高く評価されていることを物語っている。また、国内外の学会でも積極的に発表を行なっており、国内における本研究分野の最重要学会である応用物理学会において、招待講演を行うなど、本研究の注目度の高さが伺える。

### (3) 今後の展望

アモルファスからの結晶化現象を広く研究することで、多くの知見が得られた。本研究における大きな成果として、今後の発展に期待がもたれる2点について説明する。1点目は、本手法によるアモルファス薄膜の作製は、組成の自由度が極めて大きいことである。従来の層状物質の作製手法では、熱力学的に安定な相としての形成がほとんどであるが、本研究の手法では第三元素の任意添加や異なる化合物間の固溶体の作製なども可能である。今後、より高い機能性のある材料開発を目指す上で、組成の調整による特性向上は極めて有効であると考えられる。2点目は、アモルファスを起点とする場合、例えば  $\text{MoS}_2$  や  $\text{MoTe}_2$  において、安定な 2H 構造になる前に、準安定な 1T' 相へと結晶化することがわかった。この手法を駆使すれば、これまでになかった未知の準安定層状物質の開拓へと発展していく可能性を秘めている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Krbal Milos, Prokop Vit, Prikryl Jan, Pereira Jhonatan Rodriguez, Pis Igor, Kolobov Alexander V., Fons Paul J., Saito Yuta, Hatayama Shogo, Sutou Yuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved Ordering of Quasi-Two-Dimensional MoS <sub>2</sub> via an Amorphous-to-Crystal Transition Initiated from Amorphous Sulfur-Rich MoS <sub>2</sub> +x	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.1c01504	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 Krbal Milos, Prokop Vit, Kononov Alexey A., Pereira Jhonatan Rodriguez, Mistrik Jan, Kolobov Alexander V., Fons Paul J., Saito Yuta, Hatayama Shogo, Shuang Yi, Sutou Yuji, Rozhkov Stepan A., Stellhorn Jens R., Hayakawa Shinjiro, Pis Igor, Bondino Federica	4. 巻 4
2. 論文標題 Amorphous-to-Crystal Transition in Quasi-Two-Dimensional MoS <sub>2</sub> : Implications for 2D Electronic Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 8834 ~ 8844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnan.1c01504	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 Hatayama Shogo, Kobayashi Keisuke, Saito Yuta, Fons Paul, Shuang Yi, Mori Shunsuke, Kolobov Alexander V., Sutou Yuji	4. 巻 5
2. 論文標題 Understanding the low resistivity of the amorphous phase of Cr <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> phase-change material: Experimental evidence for the key role of Cr clusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 085601-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.085601	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 Saito Yuta, Morota Misako, Makino Kotaro, Tominaga Junji, Kolobov Alexander V., Fons Paul	4. 巻 135
2. 論文標題 Recent developments concerning the sputter growth of chalcogenide-based layered phase-change materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 106079-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2021.106079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Morota Misako, Saito Yuta, Uchida Noriyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Enhancement of Spin Pumping from CoFeB to Sb2Te3 Layers by Crystal Orientation Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 physica status solidi Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2100247-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202100247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hatayama Shogo, Song Yun-Heub, Sutou Yuji	4. 巻 133
2. 論文標題 Low resistance-drift characteristics in Cr2Ge2Te6-based phase change memory devices with a high-resistance crystalline phase	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 105961-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2021.105961	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 Fukuda Takumi, Kaburauchi Ryota, Saito Yuta, Makino Kotaro, Fons Paul, Ueno Keiji, Hase Muneaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Photo induced Tellurium segregation in MoTe2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 physica status solidi Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202100633	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 -

1. 著者名 Saito Yuta	4. 巻 59
2. 論文標題 A Study of Chalcogenide Phase-Change Materials for Next-Generation Electronic Devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 387~392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.59.387	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 -

1. 著者名 Kolobov Alexander V., Saito Yuta, Fons Paul, Krbal Milos	4. 巻 257
2. 論文標題 Structural Metastability in Chalcogenide Semiconductors: The Role of Chemical Bonding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2000138 ~ 2000138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202000138	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 Hatayama Shogo, Yagi Takashi, Sutou Yuji	4. 巻 8
2. 論文標題 Mixed-conduction mechanism of Cr <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> film enabling positive temperature dependence of electrical conductivity and Seebeck coefficient	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Results in Materials	6. 最初と最後の頁 100155 ~ 100155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinma.2020.100155	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 -

1. 著者名 Fons Paul, Kolobov Alexander V., Saito Yuta	4. 巻 15
2. 論文標題 Electric Fields and Interfacial Phase Change Memory Structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2000412 ~ 2000412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202000412	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 Saito Yuta, Hatayama Shogo, Shuang Yi, Fons Paul, Kolobov Alexander V., Sutou Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Dimensional transformation of chemical bonding during crystallization in a layered chalcogenide material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4782-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-80301-5	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 Komori Yuta, Saito Yuta, Fons Paul, Hase Muneaki	4. 巻 23
2. 論文標題 Ultrafast scattering dynamics of coherent phonons in Bi <sub>1-x</sub> Sb <sub>x</sub> in the Weyl semimetal phase	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 023034 ~ 023034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abe2c0	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 -

1. 著者名 Saito Yuta, Fons Paul, Kolobov Alexander V, Mitrofanov Kirill V, Makino Kotaro, Tominaga Junji, Hatayama Shogo, Sutou Yuji, Hase Muneaki, Robertson John	4. 巻 53
2. 論文標題 High-quality sputter-grown layered chalcogenide films for phase change memory applications and beyond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 284002 ~ 284002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab850b	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 Fukuda Takumi, Makino Kotaro, Saito Yuta, Fons Paul, Kolobov Alexander V., Ueno Keiji, Hase Muneaki	4. 巻 116
2. 論文標題 Ultrafast dynamics of the low frequency shear phonon in 1T -MoTe <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 093103 ~ 093103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5143485	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

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 齊藤雄太、Paul Fons、Alexander V. Kolobov、Kirill V. Mitrofanov、牧野孝太郎、富永淳二
2. 発表標題 アモルファス結晶化を利用した高品質カルコゲナイド薄膜の作製
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤雄太
2. 発表標題 カルコゲナイド系相変化材料の発展と今後の展望
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森雄太、齊藤 雄太、フONS ポール、長谷 宗明
2. 発表標題 Bi1-xSbxの超高速コヒーレントフォノン散乱ダイナミクス
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Fukuda, Kotaro Makino, Yuta Saito, Paul Fons, Alexander V. Kolobov, Keiji Ueno, Muneaki Hase
2. 発表標題 Ultrafast dynamics of the low frequency shear phonon in 1T'-MoTe2
3. 学会等名 32nd Symposium on Phase Change Oriented Science
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤雄太
2. 発表標題 相変化材料の材料設計指針とテルライド材料の新しい展開
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuta Saito, Paul Fons, Alexander V. Kolobov, Kirill V. Mitrofanov, Kotaro Makino, Junji Tominaga, Shogo Hatayama, Yuji Sutou, Muneaki Hase, and John Robertson
2 . 発表標題 Recent update on the growth of crystalline phase change materials by sputtering
3 . 学会等名 31st Symposium on Phase Change Oriented Science 2019 (PCOS2019)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuta Saito, Alexander V. Kolobov, Paul Fons, Kirill V. Mitrofanov, Kotaro Makino, Junji Tominaga, Muneaki Hase, and John Robertson
2 . 発表標題 Revisiting the growth mechanism of layered crystalline phase change materials by sputtering
3 . 学会等名 European Phase Change and Ovonic Symposium 2019 (EPCOS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Paul Fons, Alexander V. Kolobov, Yuta Saito, Yuji Sutou, Muneaki Hase
2 . 発表標題 Sub-Nanosecond Crystallization of Melt-Quenched MoS <sub>2</sub> - An Ab Initio Molecular Dynamics Study
3 . 学会等名 Materials Research Society Meeting 2019 Fall (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takumi Fukuda, Kotaro Makino, Yuta Saito, Paul Fons, Alexander V. Kolobov, Keiji Ueno and Muneaki Hase
2 . 発表標題 Ultrafast coherent lattice vibrations in 1T'-MoTe <sub>2</sub> bulk crystal
3 . 学会等名 Materials Research Society Meeting 2019 Fall (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 福田拓未, 牧野孝太郎, 齊藤雄太, Paul Fons, Alexander V. Kolobov, 上野啓司, 長谷宗明
2. 発表標題 1T'-MoTe2バルク結晶におけるコヒーレントフォノンの観測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019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
研究分担者	牧野 孝太郎  (MAKINO Kotaro)  (30727764)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員   (82626)	
研究分担者	長谷 宗明  (HASE Muneaki)  (40354211)	筑波大学・数理物質系・教授   (12102)	
研究分担者	齊藤 雄太  (SAITO Yuta)  (50738052)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員   (82626)	
研究分担者	須藤 祐司  (SUTOU Yuji)  (80375196)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	

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
---------	---------