

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02053

研究課題名（和文）次世代不揮発性メモリに向けたd電子系相変化カルコゲナイドの開拓

研究課題名（英文）Development of d-electron based phase change chalcogenide for next generation non-volatile memory

研究代表者

須藤 祐司 (Sutou, Yuji)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：80375196

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、アモルファス/結晶相変化を利用した次世代メモリ：相変化メモリに着目し、その動作性能を革新する新材料創成に取り組んだ。従来性能を凌駕する省エネルギー、高速動作かつ高耐熱性を可能にする遷移金属含有カルコゲナイドについて、アモルファス中では遷移金属元素がナノクラスター化する事を実験的に明らかにし、相変化に伴うナノクラスター減少により電気物性が大きく変化する事が分かった。また、窒素添加により、ナノクラスター形成を抑制でき、電気物性を制御できることを明らかにした。更に、アモルファス化を必要としない、超省エネルギーかつ超高速動作を実現する結晶多形転移メモリ材料の創成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Society5.0に向け、膨大なデータを保管する不揮発性メモリの高性能化が強く求められている。現在主流の不揮発性メモリはその動作原理故に、その性能向上は限界に達しつつある。それ故、新メモリが世界中で研究開発されているが、中でも相変化メモリは、材料の相変化に伴う抵抗変化を利用してデータ記録する単純な動作原理を持つ。本研究では相変化メモリの革新に向け、従来性能を凌駕する新材料を創成し、その相変化挙動の解明に取り組んだ。相変化材料中の遷移金属元素の重要な役割を明らかにすると共に、省エネ、高速動作かつ高耐熱性を可能とする相変化メモリを実現する事に成功し、学術的にも工業的にも意義の高い成果を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on next-generation memory: phase-change memory which relies on the change in physical properties due to amorphous/crystalline phase change of phase-change material (PCM). We tried to develop new PCMs which can enhance phase-change memory performance. In transition-metal containing PCMs which enable lower energy-, faster speed-operation and higher heat resistance than conventional PCMs, transition-metal elements were found to form nano-clusters in the amorphous phase. The volume fraction of nano-clusters decreased with phase-change, which induces the drastic change in electrical properties. It was also found that the addition of nitrogen can suppress the formation of nano-clusters and control the electrical characteristics. Furthermore, we found a crystalline polymorphic PCM which does not require amorphization. The crystalline polymorphic phase-change material can realize phase-change memory showing ultralow energy- and ultrafast speed-operation.

研究分野：材料相変態

キーワード：相変化メモリ 不揮発性メモリ アモルファス 結晶化 結晶多形転移

1. 研究開始当初の背景

フラッシュメモリに代わる次世代不揮発性メモリ (NVM) として相変化メモリ (PCRAM) が注目されている。その動作原理は、相変化材料 (PCM) の結晶相 (C 相：低抵抗) とアモルファス相 (A 相：高抵抗) の抵抗差を利用しており、電気パルスを用いたジュール加熱により相変化を生じさせ情報を記憶・消去する。その単純な原理から、極めてシンプルなメモリセル構造が実現でき、他の次世代 NVM に比して低コスト、高集積化が可能である。現行の実用 PCRAM には光ディスクで実績のある Ge-Sb-Te 系カルコゲナイド (GST) が PCM として使われている。GST は相変化に伴い大きなバルク抵抗率変化 (4桁以上) を示し、また、その相変化は高速 (数十 ns) であるため、高いデータ読み取り信頼性と高速動作を実現している。その一方で、次世代 PCRAM に向けては、相変化に伴う体積変化が大きい [繰り返し性能向上に難]、また、A 相の結晶化温度 (T_c) が約 160°C と低い [低耐熱性] といった GST の材料学的課題が指摘されている。元来、GST は光ディスク用 PCM (C 相/A 相の反射率差を利用) として開発され、その最大の特徴は相変化に伴う大きな反射率変化であり、結晶化に伴い 20% 以上反射率が增加する。この C 相の高い反射率は p 電子の共鳴結合 (非局在化) に起因すると理解されているが、Clausius-Mossotti の関係によれば、材料の誘電率は密度に関係しており、密度が大きくなるとその材料の反射率は増加する。言い換えれば、共鳴結合により大きな反射率を持つ p 電子系 PCM 結晶は大きな密度を持つため、C/A 相変化に伴う大きな体積変化は避けられない。

以上のような背景の下、本研究グループは、従来の設計指針にとらわれず、熱力学的観点から、高い T_c を持つ、Cu や Cr といった遷移元素を含有する次世代 PCRAM 用 PCM (Cu_2GeTe_3 や $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$) を提案してきた。最近の研究により、CuGT 結晶は共鳴結合を生じず、相変化に伴う密度変化が小さく、また、GST と同様に大きな抵抗変化を示すと共に、高速相変化を示す事が分かってきた。更に、硬 X 線光電子分光法 (HAXPES) により電子状態を調査した結果、遷移金属 $\text{Cu}3d$ 電子が相変化過程に重要な役割を果たしている事が分かった。CuGT と同様に、 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ (CrGT) も高い T_c と共に、相変化に伴う密度変化が小さい事が分かってきた。以上の知見は、遷移金属 d 電子が結合の主役を担う d 電子系 PCM が次世代 PCM として有望である事を示唆する。それ故、 d 電子系 PCM の A 相高耐熱性や相変化に伴う大きな抵抗変化、また、その高速相変化メカニズムを明らかにする事が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、次世代 PCRAM 創成に向けた新規 PCM： d 電子系 PCM の創成に向け、CrGT をシーズ材料として、遷移金属 d 電子の結合への関与を利用した新しいタイプの相変化機構の学理を構築すると共に、次世代 PCM 開発の新しい材料設計クライテリアを確立する事を目的とした。

3. 研究の方法

各種薄膜は、RF スパッタリング装置を使用し、純元素ターゲットあるいは合金ターゲットを用いた同時スパッタリングにより成膜した。膜厚は 200nm とした。結晶化温度は、二端子法を用いた電気抵抗のその場測定により評価した。ホール効果測定により、薄膜の電気物性を評価した。また、電極との接触抵抗率については、Circular Transfer Length Method (CTLM) 法を用いて測定を行った。相変化挙動については、X 線回折、透過電子顕微鏡観察により組織や結晶構造を同定すると共に、放射光を用いた光電子分光実験や X 線吸収微細構造測定により、化学結合状態や電子状態を評価した。不揮発性メモリ動作特性については、フォトログラフを用いて単純なメモリデバイスを作製し評価した。比較として既存材料である $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ を用いたメモリデバイスも作製し評価した。

4. 研究成果

(1) $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ (CrGT) の相変化メカニズム

① 結晶化メカニズム

CrGT アモルファスの結晶化メカニズムについて、示差走査熱量計を用いた非等温測定により、Ozawa 法を用いて評価した。その結果、CrGT アモルファスの結晶化の Avrami 次数は昇温速度に殆ど影響せず、3 程度の値を示す事が分かった (図 1)。この事は、その結晶化は界面成長支配である事を示す。一方で、従来材の $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) アモルファスは、同様の実験においていずれの昇温速度においても 4 以上の大きな Avrami 次数を示し、核生成支配により結晶化が進行する事を確認した (図 1)。また、結晶化における速度定数を評価した所、CrGT アモルファスの速度定数は GST のそれとほぼ同等であり、その結晶化は

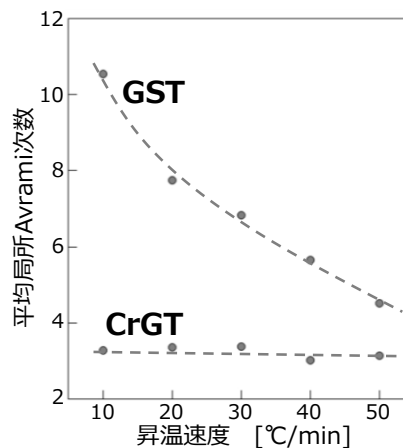


図 1. CrGT 及び GST の Avrami 次数.

極めて高速に進行する事が示された。以上より、CrGT は、高い結晶化温度を示すと同時に、成長支配による高速結晶化が可能である事が分かった。

② 相変化に伴う電気物性変化

結晶化に伴う電気抵抗の増加の観点から、その相変化に伴う電気物性変化メカニズムの解明を試みた。放射光を用いた光電子分光実験より、結晶相のフェルミレベルにおける状態密度は温度上昇と共に減少し、同時に、そのフェルミレベルはバンドギャップの中央へとシフトするため電気抵抗が増大する事が分かった。更に、広域 X 吸収微細構造測定等を用いた局所構造解析の結果、図 2 に示すように、特に Cr-Te 間の配位に顕著な変化があらわれ、アモルファス相 (Cr 原子が 3 つの Te 原子と結合) から準安定相 (Cr 及び Te が八面体配置を形成するが、Cr が若干中心からずれていて、依然として Cr 原子は 3 つの Te 原子と結合) を経由して安定相 (八面体配置: Cr 原子は 6 つの Te 原子と結合) へと相変化する事が分かった。

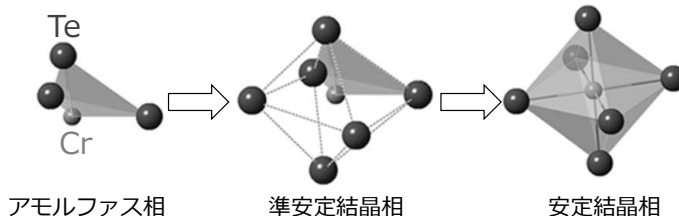


図 2. CrGT アモルファス相の結晶化に伴う局所構造変化. 昇温に伴って、アモルファス相は準安定結晶相を経由して安定結晶相への結晶化する.

また、アモルファス相及び結晶相中には、Cr ナノクラスターが存在する事が分かった。これまでに、第一原理計算により CuGT アモルファス中に Cu ナノクラスターが存在する事が他の研究グループから指摘されていた。最近、CrGT アモルファス中にも Cr ナノクラスターが存在する事が第一原理計算からも示される事が他の研究グループより報告された。この遷移金属元素からなるナノクラスター形成は、遷移金属を含有するカルコゲナイドアモルファスの特徴と言えるかもしれない。また同時に、この Cr ナノクラスターの存在は、結晶中においては、Cr 空孔が存在する事を意味する。解析の結果、この Cr ナノクラスターは温度上昇と共に減少し、即ち、Cr 空孔が減少する事でホールキャリアが減少するため、結晶化の進行に伴い電気伝導が低下することが明らかとなった。

③ 相変化に伴う密度と反射率の関係

更に本研究では、アモルファス/結晶相変化に伴う密度変化と光学反射率変化の関係を調査した。その結果、基本的には、従来材料と同様に相変化に伴う密度変化が小さい組成薄膜ほど光学反射率変化が小さい事が分かった。一方で、380℃まで加熱された薄膜では、従来の相変化薄膜とは異なり、負の密度変化 (相変化に伴う密度が減少) を呈するにもかかわらず光学反射率が増加する事が分かった。吸収係数の測定から、380℃加熱薄膜では電子の非局在化が生じていないことが示唆された。光学定数測定の結果、その特異な挙動は、相変化に伴って屈折率が大きく増加する事に起因している事が明らかとなった。

(2) CrGT の伝導機構

低い電気抵抗を有する特異な CrGT アモルファス相の伝導機構について、伝導の温度依存性から評価した。その結果、300K 以上の温度領域ではバンド伝導、300K 以下の温度領域では、ホッピング伝導により伝導している事が明らかとなった。更に、300K 以下のホッピング伝導は、200K 以上では Mott VRH 伝導、200K 以下では Efros-Shklovskii VRH 伝導に変化する事が分かった。また、CrGT アモルファス相では、従来材料のようにフェルミ準位はバンドギャップの中央にピンニングされておらず、価電子帯の直上に位置している事が明らかとなった。

(3) 窒素 (N) ドープ型 CrGT (NCrGT) 相変化材料

① 相変化に伴う局所構造変化

NCrGT 相変化材料は、相変化に伴ってバルク抵抗率は殆ど変化しない一方で、電極との接触抵抗は三桁程度変化する。この事は、例え、バルク抵抗率がアモルファス/結晶相変化によって大きく変化しなくとも相変化材料の候補になり得る事を意味しており、これまでの材料設計指針を大きく変えるものである。我々のグループでは、この相変化に伴う電極/NCrGT 界面の接触抵抗の変化を利用した、接触抵抗変化型メモリを提案してきたが、相変化によってな

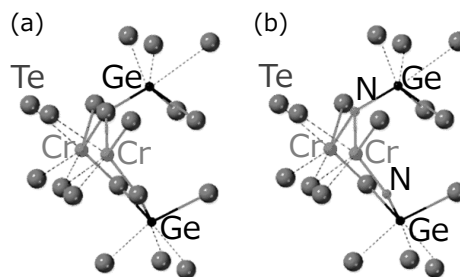


図 3. (a)CrGT 及び(b)NCrGT アモルファス相の局所構造.

ぜ接触抵抗が変化するのか、また、そもそも相変化に及ぼすNの役割について分かっていなかった。そこで本研究では、N周りの局所構造に焦点を当て、その相変化挙動を調査した。

ラマン分光測定や放射光を用いた X 線吸収微細構造測定を利用した NCrGT アモルファス相中の N 周りの局所構造評価から、N は Cr および Ge と結合していることが分かった (図 3)。この結合が高温まで維持されることによりアモルファス相の耐熱性が向上することが示唆された。また、CrGT アモルファス相中には Cr ナノクラスターが存在することが分かっているが、N 添加により Cr ナノクラスターの形成が抑制されることが分かった。この Cr ナノクラスター形成の抑制によりアモルファス相の抵抗が無添加材に比べて高くなることが示唆された。また、NCrGT 結晶相中においては、N は Te サイトを置換することが分かった。

② バルク伝導及び界面伝導メカニズム

続いて、NCrGT 相変化材料の電気伝導メカニズムを調査した。NCrGT は相変化に伴いバルク抵抗変化を殆ど示さない一方で、メモリ素子 (電極: タングステン) では三桁程度の抵抗変化が得られる。これは、電極界面伝導が NCrGT の相変化によって変化することを意味する。メモリ素子の電流-電圧特性 (図 4) から、アモルファス相ではショットキー伝導、結晶相はオーミック伝導を示すことが分かった。また、この変化は、相変化に伴いバルク自体の電気伝導メカニズムがバンド伝導 (アモルファス) からホッピング伝導 (結晶) に変化することに起因することが明らかとなった。

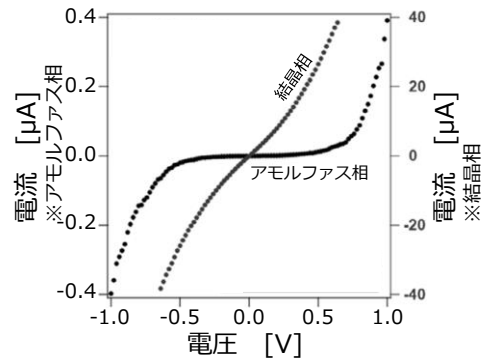


図 4. NCrGT/タングステン電極メモリ素子の電流-電圧特性.

③ メモリ・セレクトラ機能

更に、接触抵抗変化型メモリの特徴を利用した、メモリ・セレクトラハイブリッド型メモリを提案した。通常、相変化メモリ素子構造は、三次元クロスポイント型構造を呈するが、任意のメモリを選択するために、メモリ層とは別に、セレクトラ層が必須となる。このセレクトラ層には整流性が求められ、現在では、それ自身が整流性を示すアモルファスカルコゲナイドが利用されている。但し、アモルファス相の耐熱性などに課題を残している。NCrGT は、アモルファス相と結晶相の両相が p 型の半導体であり、それ自身のバルクの電気物性はほぼ等しい。それ故、その特徴を生かし、n 型酸化物と p 型 NCrGT を積層させ、pn 接合を利用することで整流性を実現する、酸化物/NCrGT 積層型メモリ・セレクトラハイブリッド型メモリを提案した。実際にメモリ素子を作製し、その評価を行ったところ、高抵抗及び低抵抗の両方の状態において、整流性が得られる事を実証した。

(4) 新材料: MnTe の提案

本研究では、CuGT や CrGT 以外の遷移金属含有のカルコゲナイド系相変化材料を模索する中で、MnTe が結晶多形転移に伴い大きな電気抵抗変化及び反射率変化を示す事を見出した。実際にメモリ素子を作製し、そのメモリ動作特性 (電極: タングステン) を評価したところ、電気抵抗が不揮発的に三桁程度変化する事を明らかにした。更に、メモリ素子の MnTe 層の相変化領域における透過電子顕微鏡観察により、その結晶多形転移は、変位型相転移により NiAs 型構造 (低抵抗状態) からウルツ鉱型構造 (高抵抗状態) に変化している事が分かった (図 5)。

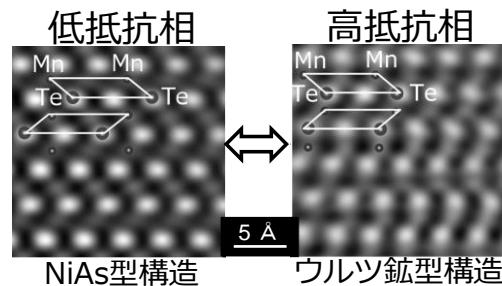


図 5. MnTe メモリ素子 (電極: タングステン) の MnTe 層相変化領域の ADF-STEM 像の逆高速フーリエ変換像。左: 低抵抗マトリクス相 (NiAs 型構造)。右: 相変化後の高抵抗相 (ウルツ鉱型構造)。

また、MnTe 薄膜上にタングステン電極層を積層させたサンプルを用い、その温度上昇に伴う多形転移挙動を透過電子顕微鏡により調査した結果、多形転移は電極界面から徐々に生じてい

ることが分かった。特に、ウルツ鉱型構造の β 相から NiAs 型構造の α 相への多形転移は、puckering と buckling の二種類の変位型相転移により進行していることが明らかとなった。

この結晶多形転移型の MnTe 相変化材料は、超高速かつ超エネルギー動作を可能とする相変化型デバイスの新材料として大いに期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計27件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Y. Saito, S. Hatayama, Y. Shuang, P. Fons, A.V. Kolobov, Y. Sutou	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 S. Mori, S. Hatayama, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 60
2. 論文標題 Thermal stability and polymorphic transformation kinetics in -MnTe films deposited via radiofrequency magnetron sputtering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 045504-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abee03	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 Y. SHuang, S. Hatayama, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 15
2. 論文標題 Temperature-Dependent Electronic Transport in Non-Bulk-Resistance-Variation Nitrogen-Doped $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ Phase-Change Material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi - Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2000415-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202000415	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 S. Hatayama, Y. Abe, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 15
2. 論文標題 High Contact Resistivity Enabling Low-Energy Operation in $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ -Based Phase-Change Random Access Memory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi - Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2000392-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202000392	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 S. Mori, D. Andi, Y. Sutou	4. 巻 196
2. 論文標題 Sequential two-stage displacive transformation from to via phase in polymorphic MnTe film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials and Design	6. 最初と最後の頁 109141-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2020.109141	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 S. Shindo, Y. Shuang, S. Hatayama, Y. Saito, P. Fons, A.V. Kolobov, K. Kobayaashi, Y. Sutou	4. 巻 128
2. 論文標題 The importance of contacts in Cu ₂ GeTe ₃ phase change memory devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 165105-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0019269	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 S. Hatayama, Y. Yagi, Y. Sutou	4. 巻 8
2. 論文標題 Mixed-conduction mechanism of Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ film enabling positive temperature dependence of electrical conductivity and seebeck coefficient	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 100155-1-6
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Shuang, S. Hatayama, H. Tanimura, D. Ando, T. Ichitsubo, Y. Sutou	4. 巻 1
2. 論文標題 Nitrogen doping-induced local structure change in a Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ inverse resistance phase-change material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 2426-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0MA00554A	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 S. Mori, S. Hatayama, Y. Shuang, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 11
2. 論文標題 eversible displacive transformation in MnTe polymorphic semiconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 85-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-13747-5	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 Y. Shuang, S. Hatayama, J. An, J. Hong, D. Ando, Y.H. Song, Y. Sutou	4. 巻 9
2. 論文標題 Bidirectional Selector Utilizing Hybrid Diodes for PCRAM Applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20209-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-56768-2	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 S. Hatayama, Y. Shuang, P. Fons, Y. Saito, A.V. Kolobov, K. Kobayashi, S. Shindo, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 11
2. 論文標題 Cr-Triggered Local Structural Change in Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ Phase Change Material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials and Interfaces	6. 最初と最後の頁 43320-43329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b11535	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 S. Hatayama, D. Ando, Y. Sutou	4. 巻 52
2. 論文標題 Relation between density and optical contrasts upon crystallization in Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ phase-change material: Coexistence of a positive optical contrast and a negative density contrast	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 325111-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab233f	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 S. Hatayama, Y. Sutou, D. Ando, J. Koike, K. Kobayashi	4. 巻 52
2. 論文標題 Electrical transport mechanism of the amorphous phase in Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ phase change material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 105103-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aafa94	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 Y. Saito, S. Hatayama, Y. Shuang, S. Shindo, P. Fons, A.V. Kolobov, K. Kobayashi, Y. Sutou	4. 巻 12
2. 論文標題 Systematic materials design for phase-change memory with small density changes for high-endurance non-volatile memory applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 051008-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab1301	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47件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 須藤祐司, 畑山祥吾, 森竣祐, SHUANG YI
2. 発表標題 省エネ・高速化に向けた新相変化メモリ材料開発
3. 学会等名 応用物理学会春期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畑山祥吾, 須藤祐司
2. 発表標題 不揮発性メモリ用逆抵抗変化型相変化材料の開発
3. 学会等名 応用物理学会春期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須藤祐司, 畑山祥吾, 森竣祐, SHUANG YI
2. 発表標題 相変化メモリ材料の研究開発動向
3. 学会等名 薄膜・表面物理セミナー「ニューデバイスに向けた最新メモリデバイス・薄膜材料技術」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤祐司, 畑山祥吾, SHUANG YI, 森竣祐
2. 発表標題 省エネルギー動作に向けた相変化メモリ材料の研究開発
3. 学会等名 応用物理学会秋期講演大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Sutou, Shunsuke Mori, Yi Shuang, Shogo Hatayama
2. 発表標題 Phase-change materials for low-energy operation PCRAM
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shogo Hatayama and Yuji Sutou
2. 発表標題 Inverse Resistance Change PCRAM with Cr ₂ Ge ₂ Te ₆
3. 学会等名 The Future of Materials Engineering - Dramatic Innovation to the next 100 years(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須藤 祐司、畑山 祥吾
2. 発表標題 相変化メモリ(PCRAM)の省エネルギー化に向けた材料開発
3. 学会等名 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 畑山祥吾、須藤祐司、安藤大輔、小池淳一
2. 発表標題 低抵抗アモルファス相と高抵抗結晶相を有するCr ₂ Ge ₂ Te ₆ を用いた相変化メモリ
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会(招待講演)
4. 発表年 2018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	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)	

	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 協力者	フォンス ジェイムスポール (Fons JamesPaul)		
研究 協力者	小林 啓介 (Kobayashi Keishuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	小池 淳一 (Koike Junichi)		
研究協力者	安藤 大輔 (Ando Daisuke)		

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			
ロシア連邦	Herzen State Pedagogical University			
韓国	Hanyang University			