

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02663

研究課題名（和文）Na添加を用いた結晶成長技術の革新による高効率Inフリー化合物薄膜太陽電池の開発

研究課題名（英文）Novel crystal growth technology using Na-addition for developing high-efficiency In-free compound thin-film solar cells

研究代表者

荒木 秀明（Araki, Hideaki）

長岡工業高等専門学校・物質工学科・教授

研究者番号：40342480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：大規模量産が可能な次世代太陽電池材料として、希少元素Inや毒性元素Se等を含まないInフリー材料の開発が求められている。本研究では、Inフリー材料の一つであるCu₂(Ge, Sn)S₃（CTGS）に着目し、そのベース化合物であるCu₂SnS₃（CTS）をモデルとして、薄膜の結晶成長技術を検討した。Na添加CTS薄膜は硫化温度570度以上では単斜晶構造の単相が得られ、太陽電池の効率も向上することを明らかにした。また、CTS/CdS界面の最適化を行い、CTS太陽電池の高効率化の指針を得た。これらの結果に基づき、CTGS薄膜の作製プロセスの改善により、変換効率4%を超えるCTGS太陽電池を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代太陽電池としてCIGSなどの省資源な薄膜光吸収材料が注目されているが、希少元素Inや毒性Seを使用しており、環境負荷や資源の枯渇が懸念され、希少元素や毒性元素を含まない高効率太陽電池材料の開発が重要な課題となっている。本研究は、将来の太陽電池材料の新たな候補として、In資源の制約を受けないInフリー硫化物系薄膜太陽電池材料であるCu₂(Sn, Ge)S₃を用いた薄膜太陽電池の実現を目指した研究であり、結晶成長やデバイス構造に関して新たな知見を得た。これら成果は、Inフリー化合物薄膜太陽電池の実現に向けた技術として、再生可能エネルギー技術の発展に資するものである。

研究成果の概要（英文）：Currently, there is a need to develop In-free materials for next-generation solar cells that can be mass-produced on a large scale. In this study, we focused on Cu₂(Ge, Sn)S₃ (CTGS), an In-free material, and investigated the crystal growth mechanism of a thin film using its base compound, Cu₂SnS₃ (CTS), as a model. By doping the CTS thin films with Na at a sulfurization temperature above 570 °C, a single-phase monoclinic structure with improved solar cell performance was obtained. In addition, the optimization of the CTS/CdS junction provides guidelines for improving the efficiency of CTS solar cells. Overall, we propose an optimized fabrication process for CTGS thin-film solar cells with conversion efficiencies exceeding 4%.

研究分野：電子・電気材料工学

キーワード：太陽電池 薄膜 硫化物 カルコゲン化合物 銅錫ゲルマニウム硫化物 インジウムフリー Na添加効果 結晶成長

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

再生可能エネルギーの一つである太陽電池が、将来のエネルギー源として重要な役割を果たすために、変換効率の向上とともに大規模量産が可能な資源的制約を受けない次世代太陽電池の実現が望まれている。すでに省資源タイプの薄膜太陽電池としてCu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 薄膜太陽電池が製品化されているが、希少元素インジウム(In)、毒性元素セレン(Se)を含むことから、大規模量産時には環境負荷や希少資源の枯渇が懸念され、In や Se を含まない高効率で省資源性に優れた太陽電池材料として、Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) などのインジウムフリー光吸収層材料の開発が活発になっている。

本研究では、新たな太陽電池光吸収層材料として、希少元素 In や毒性元素 Se を含まないCu₂(Sn,Ge)S₃ (CTGS)に着目し、インジウムフリー材料では実現困難であった高効率で省資源性に優れた薄膜太陽電池を実現し、大規模量産可能な太陽電池実現に向けて足がかりを構築することで、将来の材料資源とエネルギー資源の問題の解決を目指した。

これまでに研究代表者は、2011年に世界に先駆けてCu₂(Sn,Ge)S₃ 太陽電池のベースであるCu₂SnS₃ (CTS) 太陽電池において1%を超える発電に成功し、2015年にはCTS 太陽電池の当時報告されている世界最高効効率を報告するなど、CTS、CTGS 系太陽電池研究に取り組んできた。特に、Na 添加したCTS 太陽電池において光起電力特性の向上を見出し(JJAP, 57 (2018) 08RC11)、そのNa 添加効果について理解を深めるなど、基礎研究を進めることにより、さらなる特性向上が期待される。

2. 研究の目的

大規模量産が可能な次世代太陽電池材料として、希少元素(In)や毒性元素(Se)等を含まないInフリー材料の開発が望まれている。本研究では、Inフリー材料の一つであるCu₂(Sn,Ge)S₃ (CTGS)に着目し、そのベース化合物であるCu₂SnS₃ (CTS)をモデルとして、薄膜の結晶成長機構の解明と結晶成長に伴う薄膜物性の改善を行い、得られた知見に基づいてCTSやCTGS 薄膜の作製プロセスを最適化することで高効率なInフリー化合物系薄膜太陽電池の実現を目指した。

CTGS系薄膜を対象として、これまでに得られたCTS 薄膜に対するNa 添加による結晶性の向上や太陽電池特性の改善などの結果に基づき、薄膜作製プロセスを最適化することにより、CTGS系薄膜の高品質化とCTGS系薄膜太陽電池の高効率化に取り組んだ。

3. 研究の方法

Inフリー材料であるCTGSに着目し、そのベース化合物のCTSをモデルとして、薄膜の結晶成長とそれに伴う物性の改善を行い、CTGSやCTS 薄膜の作製プロセスを最適化することで高効率なInフリー化合物系薄膜太陽電池の実現を目指し、以下の課題に取り組んだ。

(1) Na 添加Cu₂SnS₃ 薄膜における結晶成長の硫化温度依存性^[1]

SiO₂ 基板上に下部電極として厚さ約0.8μmのMo層をスパッタ製膜したSiO₂/Mo上に電子線蒸着装置を用いてSn,Cuの順に製膜し、このSn/Cu積層プリカーサ上に、NaF 10mgを抵抗加熱により真空蒸着した。作製したSiO₂/Mo/Sn/Cu/NaFプリカーサは石英容器に硫黄100mgとともに入れ、管状炉を用いて窒素雰囲気下で所定の硫化温度(500, 510, 520, 530, 540, 560, 570, 600 °C)まで10 °C/minで昇温させ、2時間保持後、自然冷却することで硫化処理を行った。作製したCTS 薄膜はイオン交換水に30分間、浸漬させることでエッチング処理を行い、CTS 薄膜上の残留NaFやNa化合物を除去した。また、SiO₂/Mo/CTS 薄膜試料は5×10mmサイズに切り出し、Mo/CTS 薄膜を混酸(硝酸0.1 mL, 塩酸0.5 mL)で溶解させ、誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP, 島津ICPS-7510)を用いてNa, Cu, Sn, S量を測定した。また、X線回折(XRD, Rigaku Miniflex), ラマン分光(Jasco, RMP-510)を用いて結晶構造解析、走査型電子顕微鏡(SEM, JEOL JSM-6060LV)を用いて表面及び断面形態観察を行った。続いて化学浴堆積法を用いて70 °Cの湯浴中で20分間CdSを堆積させた。その後、大気下で200 °C, 30分間のアニールを行った。この試料にRFマグネトロンスパッタによりAZO(ZnO, Al₂O₃ 2wt%)ターゲットを用いて、450nm程度のZnO:Al層を製膜した。最後にAlを楕円型上部電極として真空蒸着した。作製したCTS 薄膜太陽電池セルは、ソーラーシミュレーターを使用して100 mW/cm², AM1.5の照射下で光起電力特性を測定した。

(2) In-situ ラマン分光系の構築と硫化中CTS 薄膜結晶の相変化の検出^[2]

ラマン分光測定装置(Jasco, RMP-510)に顕微鏡用加熱ステージ(リンカム製, 10042D)を組み合わせ、in-situ ラマンシステムを構築し、硫黄雰囲気中でのCTS 薄膜の硫化プロセスによる結晶成長過程の観察を試みた。構築したシステムを用いてSi 標準試料を加熱しながらin-situ ラマン測定を行ったところ、文献で報告されている値とよく一致しており、in-situ ラマンスペクトル観察が可能であることを確認した。試料のCTS 前駆体はMoコートEagle XG基板(Eagle

XG/Mo)上にCu, Sn, Sを基板温度300°Cで3時間, 同時蒸着することにより作製し, 作製された試料は, CTS太陽電池の光吸収層に適した組成であるCu-poorのCu/Sn組成比1.865であった。

硫黄とCTS前駆体の両試料は, サファイアで蓋をした白金鍋に入れ, 試料を加熱しながらラマン分光測定を行った。

(3) CTS薄膜太陽電池のヘテロ接合界面の電子構造評価と熱処理条件の最適化^[3, 4]

CTS系薄膜太陽電池の高効率化への取り組みとして, CdS/CTS接合界面の電子構造に関する知見を得るため, 正・逆光電子分光法による評価を行った。硫化法で作製したNa添加CTS薄膜の表面を低エネルギーArイオンビームにより露出させた試料を用いて, 表面組成, 電子構造及びそれらの超高真空中(UHV)熱処理による変化, CdS/CTS界面バンド接続をXPS-UPS/IPES及びそれらとCdSのステップ蒸着を組み合わせたin-situ測定により評価した。

また, 同時蒸着を用いて作製したCTS薄膜上に, 化学浴堆積によりCdSを堆積することでCTS/CdSヘテロ接合を形成し, CdS成膜後のN₂雰囲気中でのアニール温度を変化させて, ヘテロ接合形成後のアニール温度が太陽電池特性に及ぼす影響を調べた。

(4) Cu₂GeS₃薄膜へのNa添加の適用

Eagle XG/Mo上に同時蒸着装置を用いて基板温度150°CにてCu, Ge, Sを3時間, 製膜した。このときS源の温度は150°Cとし, 800°Cで熱クラッキングした。Cu-poorのCu/Ge組成比1.56, 1.60, 1.67, 1.71, 2.00のCGS系薄膜を作製した。Na添加試料は真空蒸着装置でNaF 10 mgを蒸着することで, CGS/NaF積層前駆体とした。その後, 赤外線加熱炉で100 mgの硫黄とともに2°C/secで昇温し, 570°Cで5 min保持することで硫化処理を行った。作製したCGS系薄膜上に化学浴堆積(CBD)法でCdSを, スパッタ法で窓層ZnO:Alを堆積させ, 真空蒸着装置でAl電極を楕形のマスクを用いて製膜し, Eagle XG/Mo/CGS/CdS/ZnO:Al/Al構造の太陽電池素子を形成し, ソーラーシミュレーターを用いてAM1.5, 100mW/cm²照射下での光起電力特性を測定した。

(5) CTGS薄膜へのNa添加とCTGS薄膜太陽電池の高効率化

同時蒸着により作製したCTGS薄膜を用いたCTGS薄膜太陽電池の作製条件を検討した。CTGSプリカーサは同時蒸着法により, 1段階目にCu, Ge, Sを蒸着したのち, 2段階目にCu, Sn, Sを蒸着することで作製し, それぞれの蒸着時間の比率を変化させることで, [Ge]/([Sn]+[Ge])組成比([Ge]/[IV])の制御を試みた。作製したCTGSプリカーサは10 mgのNaFを蒸着して, 100 mgの硫黄とともにカーボンサセプターに入れ, 赤外線加熱炉にて熱処理を施した。この時, 一方はサセプターに対して表向きに設置し, 他方はサセプターとCTGSプリカーサが接触する形で裏向きに設置した。熱処理を施したCTGS薄膜を用いてGlass/Mo/CTGS/CdS/ZnO:Al/Al構造の太陽電池素子を作製し, 光起電力特性を評価した。

4. 研究成果

高効率なInフリー化合物系薄膜太陽電池の実現を目指して, Cu₂(Sn, Ge)S₃(CTGS)に着目し, そのベース化合物のCu₂SnS₃(CTS)をモデルとして, 薄膜の結晶成長とそれに伴う物性の改善を行うとともに, CTGSやCTS, CGS薄膜と太陽電池素子の作製を行い, 以下の知見を得た。

(1) Na添加Cu₂SnS₃薄膜における結晶成長の硫化温度依存性^[1]

硫化温度に対するCu/Sn比は硫化温度上昇に伴い僅かに増加傾向を示したが全ての試料がCu₂SnS₃の化学量論組成よりCu-poor組成であることが確認された。また, Na/(Na+Cu)比は約0.07~0.09程度でほぼ一定となり, 本研究のMo/CTS薄膜に対するNaF添加量では, 硫化後のMo/CTS中へのNa取り込み量は, 硫化温度に依らないと考えられる。図1に各硫化温度に対するSEM観察像を示す。硫化温度500~540°Cにおいて表面形態に大きな変化は観察されなかったが, 硫化温度560°C以上において結晶粒径の著しい増大が観察された。硫化後のCTS薄膜に対するex-situによるラマンスペクトル測定において, 290 - 300 cm⁻¹付近にmonoclinic構造によるピークとcubic構造に帰属されるピークとが重なり合っていると考えられるピークが観察された。monoclinic構造単相が得られる温度を明らかにするために200~400 cm⁻¹の範囲でピーク分離を行い, cubic(303 cm⁻¹)とmonoclinic(290 cm⁻¹)のピークの面積比を算出することで, monoclinic相の存在量を見積もった。図2にmonoclinic/(cubic + monoclinic)比の硫化温度依存性を示す。硫化温度の上昇に伴いcubic構造に帰属されるピーク強度は減少し, 570°C以上でmonoclinic構造の単相となることを明らかにした。作製したCTS太陽電池セルの変換効率の硫化温度依存性を図3に示す。硫化温度560°C以上で開放電圧Voc, 短絡電流密度Jsc, 曲線因子FF, 変換効率PCEが向上することが観察され, 最も良好な特性は, 硫化温度600°Cのセルにおいて, 開放電圧Voc=0.251 V, 短絡電流密度Jsc=32.3 mA/cm², 曲線因子FF=0.308, 変換効率η=2.50%が得られた。Na添加によるCTS結晶粒径の増大やmonoclinic構造の単相化が進む560°C以上において, 起電力特性が著しく向上しており, 結晶粒径の増大及びmonoclinic相の単相化が光起電力特性の向上に必要な因子であると示唆される。従って, monoclinic単相が得られる硫化温度570°C以上で均一で緻密な膜を形成することが変換効率向上に重要であることを明らかにした。

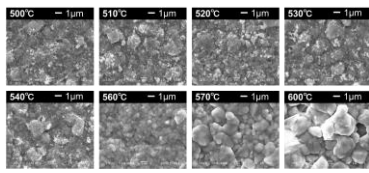


図1 各硫化温度における表面 SEM 像

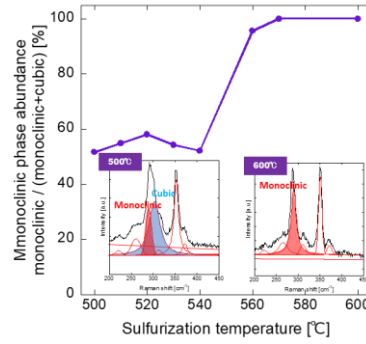


図2 500°C, 600°Cにおけるラマンスペクトルのピーク分離および単斜晶相存在量の硫化温度依存性

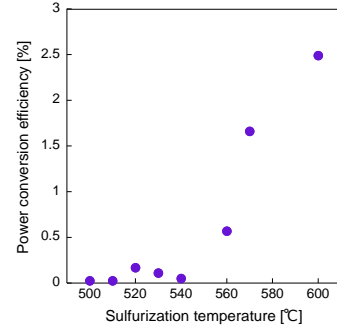


図3 作製した CTS セルの変換効率の硫化温度依存性

(2) In-situ ラマン分光系の構築と硫化中 CTS 薄膜結晶の相変化の検出^[2]

同時蒸着 CTS 薄膜の硫化中のラマンスペクトルの測定から、室温から低温において立方晶構造に帰属されるラマンピークを示していた CTS 薄膜は、約 550°C 以上になると、立方晶から単斜晶へのピーク位置のシフトが観察され、この温度以上での単斜晶構造形成が示唆された。このように in-situ ラマン分光法は単一相を得るための条件を調べるための有効な手段であることを明らかにした。

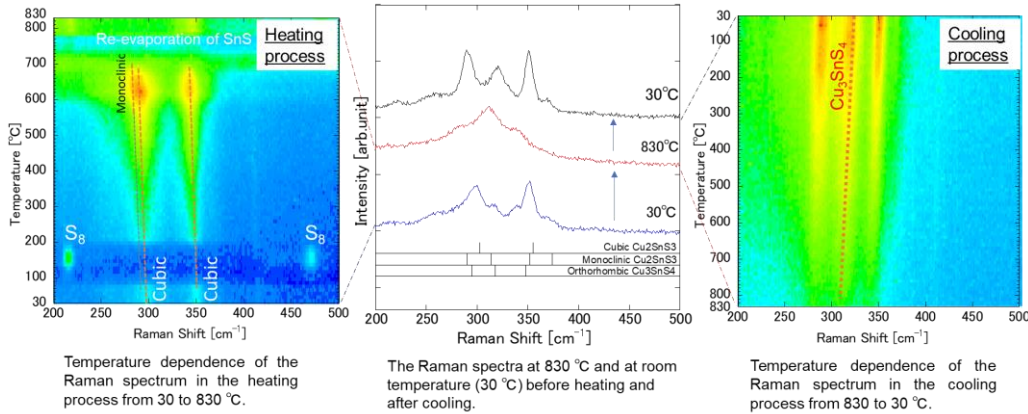


図4 同時蒸着 CTS 前駆体薄膜の硫化過程の In-situ ラマンスペクトル測定 (昇温プロセスおよび降温プロセス)

(3) CTS 薄膜太陽電池のヘテロ接合界面の電子構造評価と熱処理条件の最適化^[3, 4]

UHV 熱処理前の CTS 表面には低伝導帯下端を持つ Cu-rich な相が存在し、UHV 熱処理によって Cu-poor な相に変化することが示唆される結果を得た。また、CdS/CTS 界面の伝導帯オフセットは、界面再結合の抑制に有利とされる small spike 型の伝導帯接続となることが示唆された。

また、この太陽電池として適した small spike 型の伝導帯接続となることに加え、ヘテロ接合を形成した後の熱処理により、この伝導帯オフセットが増加することも観察されたことから、CTS/CdS ヘテロ接合形成後のアニール処理温度による太陽電池特性の影響を検討した。

同時蒸着の際の基板温度条件の異なる二つの batch の CTS 薄膜を作製した。硫化後の Cu/Sn 組成比はいずれも 1.83 であった。このような CTS 薄膜を用いて太陽電池を作製した。図5に示すように、アニール時間 30 分として温度を 250~275°C の範囲で上昇させると CTS 太陽電池の変換効率は向上した。しかし、アニール温度が 275°C を超えると太陽電池特性は低下した。したがって、本研究で評価した CTS 太陽電池の製造において、CTS/CdS 界面に最適な pn 接合を形成するためには、CdS 堆積後に 250~275°C の範囲でアニールすることが重要であることが示唆された。最も特性の良い太陽電池セルは、CdS 堆積後 275°C でアニールしたときに得られ、開放電圧 0.181 V、短絡電流密度 20.8 mA/cm²、曲線因子 0.462、電力変換効率 1.74%を示した。

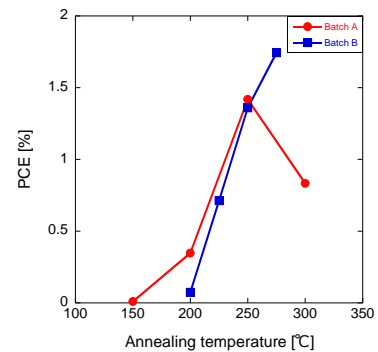


図5 CTS/CdS セルの変換効率のアニール温度依存性

(4) Cu_2GeS_3 薄膜への Na 添加の適用

作製した CGS 薄膜の硫化後のラマン測定から、Na 添加無しの試料では cubic 構造に帰属されるピークとともに、monoclinic 構造に帰属されるピークが確認された。Na 添加試料では cubic 構造に帰属されるピークは確認されず、monoclinic 構造に帰属されるピークのみ確認された。このことから、Na 添加無しの試料では cubic 構造と monoclinic 構造が混在する薄膜となるが、Na 添加の薄膜では monoclinic 構造の単相が得られ、Na 添加により、monoclinic- Cu_2GeS_3 の成長が促進されることを明らかにした。このような CGS 薄膜を用いたセルの光起電力特性を評価した結果を図 6 に示す。Na 添加することで良好な特性が得られることを明らかにした。

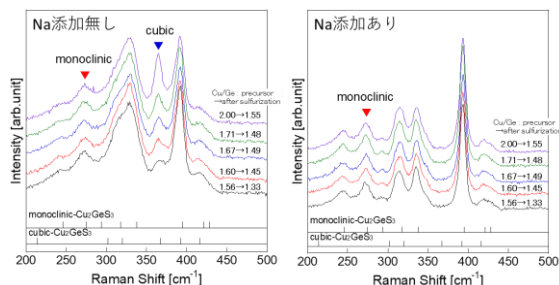


図 5 CGS 薄膜に対する Na 添加の有無によるラマンスペクトルの比較 (凡例は硫化前後の Cu/Ge 組成比)

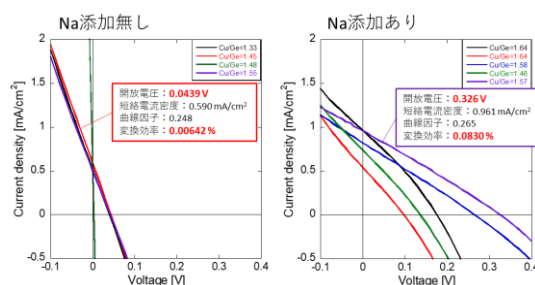


図 6 CTS/CdS セルの変換効率のアニール温度依存性

(5) CTGS 薄膜への Na 添加と CTGS 薄膜太陽電池の高効率化

熱処理後の薄膜は、いずれもプリカーサと比較して $[\text{Ge}]/[\text{IV}]$ の減少が観察されたが、サセプターに対して裏向きに設置して熱処理した薄膜ではこの減少が抑制された。 $[\text{Ge}]/[\text{IV}]$ の減少は Ge-S の再蒸発に起因すると考えられ、裏向きの熱処理によって再蒸発を抑制できることを明らかにした。図 7 に作製した CTGS 薄膜太陽電池における電流密度-電圧特性 (J-V) を示す。いずれの $[\text{Ge}]/[\text{IV}]$ のセルにおいても、サセプターに対して裏向きに設置して熱処理した薄膜では表向きに設置した場合と比べて開放端電圧 (V_{oc}) と短絡電流密度 (J_{sc}) が明らかに改善することが見出され、変換効率 4% を超える光起電力特性を得ることに成功し、CTGS 薄膜太陽電池の高効率化のための新たな指針を得ることができた。

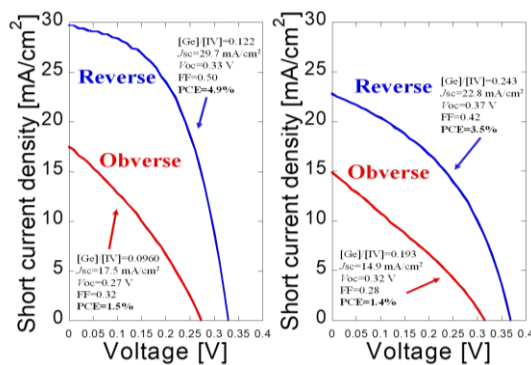


図 7 作製した CTGS セルの光起電力特性

以上のような CTGS への Na 添加による結晶成長促進の研究を進める中で、 Cu_2SnS_3 太陽電池の光電変換特性を大幅に向上させる新たな因子として、Na 以外のアルカリ金属元素の添加^[5]や金属元素 Au と Na の共添加によっても著しい結晶成長が促進される現象を見出した^[6]。このようにして結晶成長させた CTS 薄膜を用いた太陽電池素子では、比較的良好な特性が得られることを明らかにしたが、添加元素の役割などは未だ明らかではない。このことから In フリー硫化物太陽電池の更なる変換効率の向上のためには、元素添加効果等について、さらなる研究が必要である。

<引用文献>

- [1] K. Tanaka, S. Miyagi, D. Motai, R. Ohashi, Y. Hosokawa, K. Jimbo, Y. Akaki, H. Araki, Dependence of photoluminescence on sulfurization temperature of Cu_2SnS_3 thin films, *Applied Physics A*, 129 (2023) 360.
- [2] H. Araki, R. Ohashi, D. Motai, T. Tasaki, Y. Akaki, Raman spectroscopy study on in-situ monitoring of monoclinic Cu_2SnS_3 formation, 31st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, ID:220 (2021).
- [3] 寺田教男, 平山拓也, C. Guanzhong, 井出優弥, 宮之原 勇, 大橋亮太, 荒木秀明, $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ 界面の電子構造, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 p.12-125 (2021).
- [4] D. Motai, R. Ohashi and H. Araki, Effect of annealing temperature on p-n junction formation in Cu_2SnS_3 thin-film solar cells fabricated via the co-evaporation of elemental precursors, *Japanese Journal of Applied Physics*, 61 (2022) SB1043.
- [5] H. Araki, N. Zhang, T. Tasaki, D. Motai, Y. Akaki, Improvement of characteristics of Cu_2SnS_3 thin-film solar cells by adding alkali metals, The 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, TuP-32-11 (2022).
- [6] T. Tasaki and H. Araki, Enhancement of grain growth in Cu_2SnS_3 thin films prepared by the addition of Au and fabrication of solar cells using Au-added CTS thin films, *Japanese Journal of Applied Physics*, 62 (2023) SK1028.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takeshi Tasaki and Hideaki Araki	4. 巻 62
2. 論文標題 Enhancement of grain growth in Cu ₂ SnS ₃ thin films prepared by the addition of Au and fabrication of solar cells using Au-added CTS thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SK1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/accc94	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 Kunihiko Tanaka, Shogo Miyagi, Daiki Motai, Ryota Ohashi, Yoko Hosokawa, Kazuo Jimbo, Yoji Akaki and Hideaki Araki	4. 巻 129
2. 論文標題 Dependence of photoluminescence on sulfurization temperature of Cu ₂ SnS ₃ thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-023-06641-x	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 Daiki Motai, Ryota Ohashi, Hideaki Araki	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of annealing temperature on p-n junction formation in Cu ₂ SnS ₃ thin-film solar cells fabricated via the co-evaporation of elemental precursors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SB1043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2e56	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 Ayaka Kanai, Hideaki Araki, Ryota Ohashi, Mutsumi Sugiyama	4. 巻 59
2. 論文標題 Sulfurization of Cu ₂ (Sn,Ge)S ₃ thin films deposited by co-evaporation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCD01-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4d04	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 -

[学会発表] 計140件(うち招待講演 4件/うち国際学会 39件)

1. 発表者名 Takeshi Tasaki, Kazuo Jimbo, Daiki Motai, Masaya Takahashi, Hideaki Araki
2. 発表標題 Fabrication of Cu ₂ Sn _{1-x} GexS ₃ Thin-Film Solar Cells by Sulfurization of Cu ₂ GeS ₃ /Cu ₂ SnS ₃ Stacked Precursors
3. 学会等名 The 1st KOSEN Research International Symposium (KRIS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideaki Araki, Naiwei Zhang, Takeshi Tasaki, Daiki Motai, Yoji Akaki
2. 発表標題 Improvement of characteristics of Cu ₂ SnS ₃ thin-film solar cells by adding alkali metals
3. 学会等名 The 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideaki Araki, Ryota Ohashi, Daiki Motai, Takeshi Tasaki, Yoji Akaki
2. 発表標題 Raman spectroscopy study on in-situ monitoring of monoclinic Cu ₂ SnS ₃ formation
3. 学会等名 31st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-31) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideaki Araki
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF RARE METAL-FREE SULFIDE-BASED THIN-FILM SOLAR CELLS
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Hybrid Materials and Processing HyMaP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺田教男, 平山拓也, Chen Guanzhong, 井出優弥, 宮之原 勇, 大橋亮太, 荒木秀明
2. 発表標題 CdS/Cu ₂ SnS ₃ 界面の電子構造
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
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
研究分担者	赤木 洋二 (Akaki Yoji) (10321530)	都城工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授 (57601)	
研究分担者	寺田 教男 (Terada Norio) (20322323)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	
研究分担者	田中 久仁彦 (Tanaka Kunihiko) (30334692)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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