

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05354

研究課題名(和文) 多元系半導体ヘテロ構造の界面急峻性の制御

研究課題名(英文) Epitaxial abrupt interfaces of multinary compound semiconductors

研究代表者

西永 慈郎 (Nishinaga, Jiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：90454058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多元系化合物半導体は未知なる可能性を秘めた材料群であり、それらの積層構造による電子・光デバイスは、高性能化・高機能化・低環境負荷化が期待できる。しかしながら、デバイス応用に必須である急峻なヘテロ界面の形成が、構成元素同士の化学反応や熱拡散によって非常に困難であった。本研究は、精密な化合物組成の制御をすることで、成膜時の材料偏析や熱拡散を大幅に抑制し、急峻なヘテロ界面を得ることに成功した。得られた急峻なヘテロ界面により、高効率な太陽電池の実現に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多元系化合物半導体エピタキシャル成長の研究は、30年以上前に国際的に盛んであったが、ガラス基板上多結晶太陽電池がトレンドとなって以降、研究の進展はまったくない。本研究によって、変換効率10%であった単結晶Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池が、変換効率21.3%に改善された。単結晶化されたCu(In,Ga)Se<sub>2</sub>は、表面ポテンシャルが均一となり、基礎的物性の評価に最適といえる。本研究は多元系化合物半導体ヘテロ界面の基礎研究であり、今後、急峻なヘテロ界面を利用した量子効果デバイスへの展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：Multinary-compound semiconductors have potentials for many applications, and electronic and optical devices made from multinary compounds expect to achieve high performance, high functionality, and low environmental impact. However, the formation of their heterointerfaces, which are essential for device applications, has been extremely difficult due to thermal diffusion and chemical reactions between the elements. In this research, we succeeded in suppressing segregation and thermal diffusion during deposition by precisely controlling the compound composition, and abrupt heterointerfaces were achieved. High efficiency solar cells were realized using the abrupt heterointerfaces.

研究分野：半導体工学

キーワード：多元系化合物半導体 結晶成長 電子デバイス 光デバイス 分子線エピタキシー 太陽電池

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、様々な社会的要請に応えるべく、材料・デバイスの高性能化・高機能化に対する要求や期待がますます高まっている。従来の半導体材料の開発は、Si や GaAs、GaN などの単純な元素組成の半導体にドーピングなどを行い、デバイスとして応用してきたが、さらなる高性能化・高性能化・低環境負荷化への開発のためには、新たな材料の開発が必要不可欠である。多元系化合物半導体は複雑な組成・結晶系であるが、多くの種類の半導体が存在し、未知なる可能性を秘めた材料群といえる。

第一原理計算や、ビッグデータ解析、機械学習などのデータ科学を利用して効率的な材料設計を行うマテリアルズ・インフォマティクスや、多様な組成の材料を同時に作製するコンビナトリアル手法が、近年発展してきている。これらの研究手法を利用することで、目的の機能を有する組成・構造の選択、および作製プロセスの構築を効率的に行うことが可能となる。しかしながら、これらの手法はデバイス作製に必要な不可欠なヘテロ構造の結晶成長に関して、計算量が莫大となり、得られる結果も再現性が低い。例えば、多元系化合物半導体のヘテロ界面の構成元素は、成膜・プロセス時に熱拡散しやすく、急峻な界面を得ることが非常に困難であり、理論的に高性能が約束されるヘテロ構造であっても、性能向上が抑制されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高純度金属を利用した多元系化合物半導体の精密な組成制御法の確立および、その実証を行うことである。分子線エピタキシー(MBE)法を利用し、高精度の組成制御、高品質結晶成長を行い、急峻なヘテロ界面を形成し、デバイス応用を図る。急峻なヘテロ界面を得るためには、結晶基板との反応を抑制することが必須であり、不純物拡散の抑制を行う。

#### (1) 多元化合物半導体の精密組成制御、および in-situ 組成制御法の確立

単結晶 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS)を得るには、格子定数の近い GaAs 基板上にエピタキシャル成長させることが有効である。しかしながら、CIGS の Cu 組成を化学量論比よりも大きく (Cu rich 条件) すると、Cu と GaAs が反応し、Cu<sub>3</sub>As が界面に形成され、急峻なヘテロ界面を得ることができない。そこで、Cu 濃度の精密制御および、CIGS、GaAs 結晶中への不純物拡散を 2 次イオン質量分析計(SIMS)によって検証する。また、RHEED を用いて、化学組成によって RHEED 像がどのように変化するかを検証し、in-situ 組成制御法として確立させる。

#### (2) 異種化合物半導体ヘテロ界面を利用したデバイスの実現

多元系化合物半導体は、ドーピングによる pn 層の形成が困難であるため、ヘテロ接合による pn 接合形成が必要となる。そのため、副次的な化学反応を抑え、急峻なヘテロ界面を形成することが必須となる。III-V 族化合物半導体と I-III-VI 族化合物半導体のヘテロ pn 接合を形成し、太陽電池特性を評価する。

### 3. 研究の方法

MBE 法にて、GaAs 結晶基板上に CIGS 層を成膜した。基板温度 550 にて、Cu, In, Ga, Se を同時に照射し、化学組成は分子線強度モニタによって制御した。成膜中において、RHEED 観察を行い、化学組成、アルカリ金属処理によって、RHEED 像がどのように変化するかを検証した。成膜後、断面透過電子顕微鏡観察を行い、CIGS/GaAs 界面の結晶性について観察し、SIMS 測定によって、不純物拡散に関して、調査した。異種化合物半導体ヘテロ界面として、n 型 GaAs 基板上に、CIGS を成膜し、pn 接合として機能するかを検証した。

### 4. 研究成果

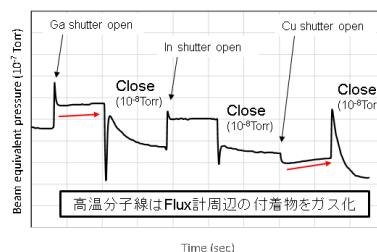
#### (1) 多元化合物半導体の精密組成制御

分子線強度を用いて、化学組成の制御を行った。図 1 に分子線強度の測定と組成比計算法を示す。Cu 等の高温セルの分子線強度を計測する際、Flux モニタ近傍の高蒸気圧材料が気化することで、背景圧力が上昇する。そのため、Flux モニタの出力をデータロガーにてモニタシャッター開時の背景圧力上昇を精密に測定することで、±2%の精度で分子線強度を計測することに成功した。

$$\frac{J_i}{J_{Ga}} = \frac{P_i \eta_{Ga}}{P_{Ga} \eta_i} \sqrt{\frac{T_i M_{Ga}}{T_{Ga} M_i}}$$

$$\frac{\eta_i}{\eta_{N_2}} = \left( \frac{0.6 Z_i}{14} + 0.4 \right)$$

$P_i$ : Beam equivalent pressure  
 $M_i$ : Relative molecular mass  
 $T_i$ : Absolute cell temperature  
 $\eta_i$ : ionization efficiency  
 $Z_i$ : number of electrons



$$BEP = BEP_{open} - BEP_{close} - BEP_{extra}$$

- $T_{Ga} = 945^{\circ}C, P_{Ga} = 3.22 \times 10^{-7} \text{ Torr}$
  - $T_{In} = 745^{\circ}C, P_{In} = 2.82 \times 10^{-7} \text{ Torr}$
  - $T_{Cu} = 1180^{\circ}C, P_{Cu} = 1.33 \times 10^{-7} \text{ Torr}$  (CGI was measured by EPMA)
- }  $GGI_{flux} = 0.7$   
 }  $CGI = 0.80$

図 1. 分子線強度の測定、および組成比計算法

III 族組成比を求める計算式を図 1 に示す。この式により Ga、In の組成比 (GGI) を求めることができ、CIGS 成膜前に組成比を精密に制御できる。この組成比は EPMA および XRD により正しいことを確認した。Cu 濃度 (CGI) に関しては、Cu イオンのイオン化率が III 族元素と異なるため、得られた CIGS 膜の Cu 濃度を電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) によって計算し、計算式に補正項を加えることで、CGI の制御を行った。

### (2) RHEED による in-situ 組成制御

図 2 に CGI:0.85 における CIGS 結晶成長中の RHEED 像を示す。基板温度 550 °C にて CIGS 層を成膜すると、{112}B ファセットに囲まれた構造物が CIGS 表面に出現する。この構造物によって、表面平坦性が低下し、図 2 に示すような RHEED 像がシェベロンパターンおよびスポットパターンとなった。CGI:0.95 以上において、RHEED 像は 4x1 のストリークパターンになることがわかった。これは、CIGS 表面に形成されるファセットが異なることを示しており、RHEED 像によって Cu 組成が in-situ にて制御可能であることを示している。

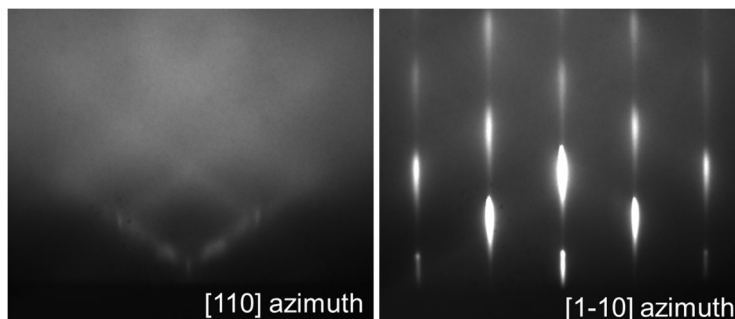


図 2 . MBE 法による CIGS 成膜中の RHEED 像

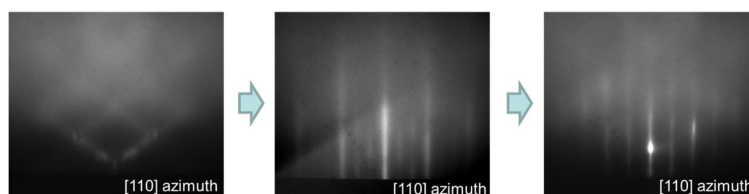


図 3 . KF 処理後の RHEED 像

多結晶 CIGS 太陽電池の高効率化技術としてフッ化カリウム (KF) 処理が知られている。単結晶 CIGS 表面に KF 処理を行ったところ、図 3 に示すように RHEED

像が変化し、2x2 構造を有するストリークパターンとなった。これは単結晶 CIGS 表面の {112}B ファセットが消失したことを示している。実際に SEM 観察を行うと、KF 処理の間に {112}B ファセットで覆われていた立体構造が消失し、平坦性の向上が確認できた。

### (3) CIGS/GaAs 界面の Cu 組成の影響

図 4 に CGI: 1.0 および CGI: 1.5 の CIGS の表面 SEM 像および断面 STEM 像を示す。CGI: 1.0 にて CIGS を成膜すると、RHEED パターンが成長開始時より 4x1 のストリーク像を示し、成膜後も 4x1 のストリーク像を示した。これは表面平坦性が高いことを示している。

断面 STEM 観察より、CdS/CIGS 界面が急峻であり、Cu<sub>2</sub>Se の析出はないことが確認された。また、Cu poor CIGS に見受けられたアンチフェイズドメインの形成が抑制されており、結晶品質が高いことがわかった。しかし、CIGS/GaAs 界面に注目

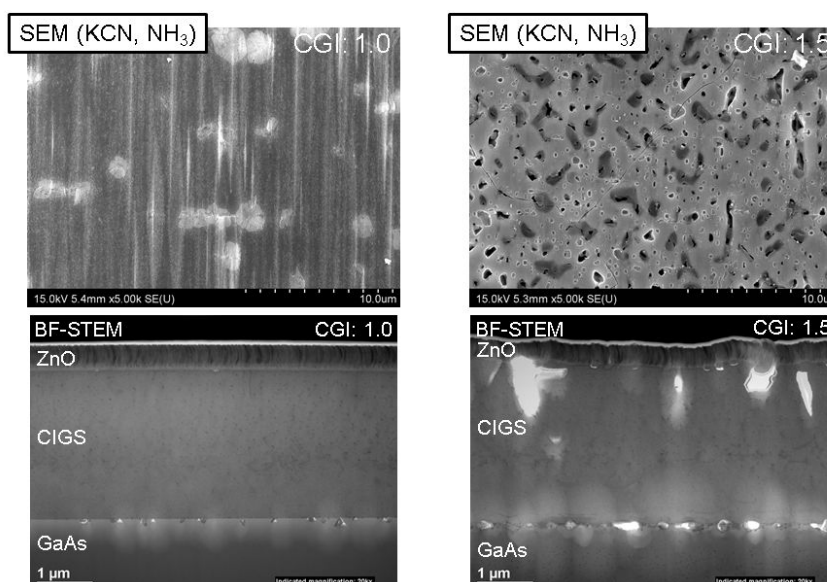


図 4 . CGI: 1.0, 1.5 の CIGS 層の SEM 像および断面 STEM 像

すると、多くの Void が発生していることがわかった。この Void は Cu poor 条件の CIGS/GaAs 界面には発生しないが、CGI が 1.0 に近付くと発生する。CGI が 1.0 を超えると、Void が大きく形成されることがわかる。

次に Cu poor 条件で CIGS 層を成膜した際の GaAs 基板中への不純物拡散を SIMS 測定にて確認したところ、Cu, In, Ga, Se, Na すべてが熱拡散されていないことがわかった。一方で、Cu rich

条件で CIGS 層を成膜したところ、Cu, In, Ga, Se は熱拡散しないが、Na が拡散することがわかった。以上より、Cu poor 条件にて CIGS 層を成膜することが、変換効率の増大、CIGS/GaAs 界面の化学反応の抑制、GaAs 基板中への不純物拡散の抑制に有効であることがわかった。

#### (4) 異種化合物半導体ヘテロ界面を利用したデバイスの実現

GaAs 基板の上に CIGS 層をエピタキシャル成長させ、高効率な CIGS 太陽電池 (変換効率 21.3%) として動作することを明らかにした。これは、P 型 GaAs 基板の上に CIGS を成膜させ、直列抵抗の低い良好な CIGS/GaAs 界面を得ることに成功していることを示している。次に、N 型 GaAs 基板の上に CIGS を成膜すれば、CIGS/GaAs

界面に pn 接合が形成され、新しい CIGS 太陽電池となると考えられる。この CIGS 太陽電池はスーパーストレート構造であり、III-V 族系タンデム太陽電池にモノリシックに CIGS ボトムセルを形成できることを意味する。

そこで n 型 GaAs 基板の上に CIGS を成膜し、太陽電池特性を評価した。GaAs(001)n-type 基板の上に CIGS を成膜し、透明導電膜として、Al-doped ZnO 膜をスパッタで成膜した。ZnO/CIGS 界面はスパッタ成膜時に低接触抵抗の界面となる。Ga 濃度を変化させて、伝導帯エネルギーを変化させた。図 5 に CIGS/GaAs n-type 構造の I-V 特性およびバンド図を示す。Ga 濃度 0.1 の場合、光起電力を確認できなかったが、Ga 濃度 0.7 で

は光起電力を確認し、変換効率 4.2% であった。この変換率は太陽電池構造の最適化を行うことで、さらなる上昇が期待できる。Ga 濃度 0.1 の場合、CIGS の電子親和力は 4.3eV となり、GaAs の電子親和力 (4.07eV) と比べて低い。そのため、光照射によって発生した電子は、CIGS 層から GaAs に拡散できず失活すると考えられる。一方で Ga 濃度 0.7 の場合、CIGS の電子親和力が 3.9eV であり、光照射によって発生した電子は、GaAs の伝導帯に拡散できる (図 5 のバンド図参照)。つまり、CIGS と n 型バッファ層は電子親和力の関係が重要と考えられる。図 6 に走査型広がり抵抗顕微鏡 (SSRM) 法による、CIGS/GaAs n-type 構造の断面図を示す。GaAs n-type 基板は電子濃度  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  程度であり、空乏層が CIGS 層に広がっている様子がわかる。以上の結果より、n 型 III-V 族化合物が CIGS 太陽電池の n 型層として機能していると結論づけられる。

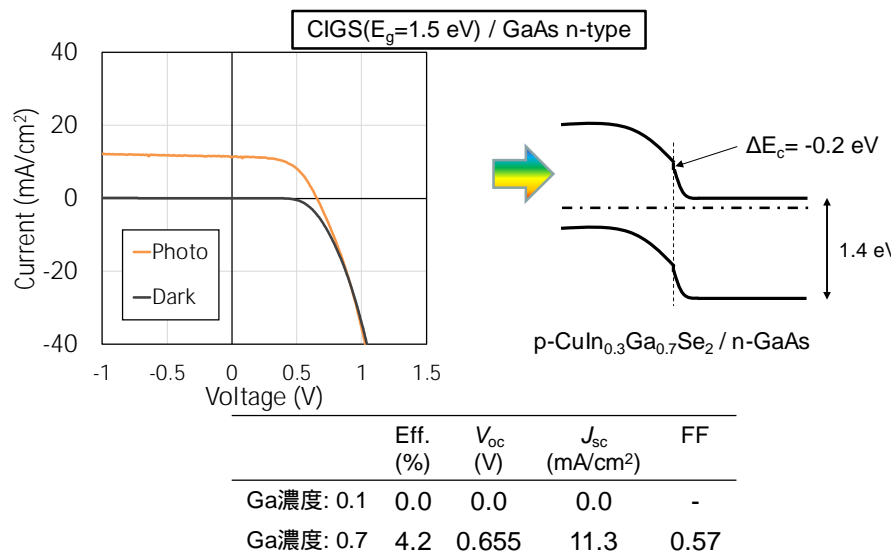


図 5. CIGS/GaAs n-type 構造の I-V 特性とバンド図

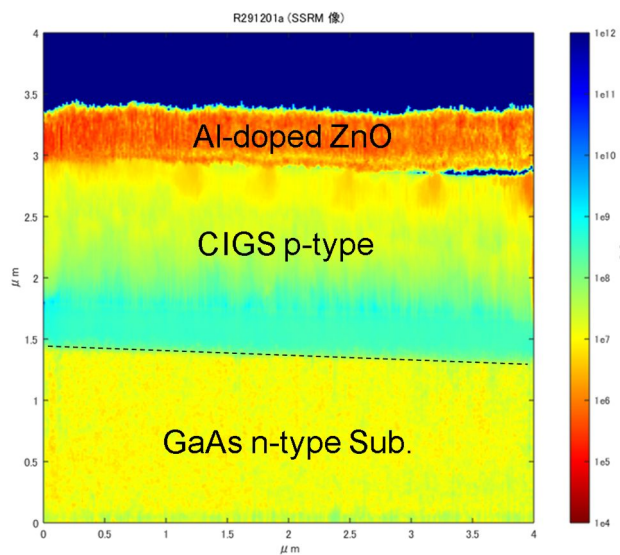


図 6. CIGS/GaAs 太陽電池の SSRM 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Weiss Thomas Paul, Ramirez Omar, Paetel Stefan, Witte Wolfram, Nishinaga Jiro, Feurer Thomas, Siebentritt Susanne	4. 巻 19
2. 論文標題 Metastable Defects Decrease the Fill Factor of Solar Cells	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 24052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.19.024052	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 Tararenko Svitlana, Nishinaga Jiro, Cojocaru-Miredin Oana	4. 巻 2021
2. 論文標題 Investigating dislocations in epitaxial Cu(In,Ga)Se2 absorbers using atom probe tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	6. 最初と最後の頁 1448-1450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC43889.2021.9519092	査読の有無 無
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 Nishinaga Jiro, Togawa Manabu, Miyahara Masaya, Itabashi Kosuke, Okumura Hironori, Imura Masataka, Kamikawa Yukiko, Ishizuka Shogo	4. 巻 62
2. 論文標題 Annealing effects on Cu(In,Ga)Se2 solar cells irradiated by high-fluence proton beam	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SK1014 ~ SK1014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc53b	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 Nishinaga Jiro, Kamikawa Yukiko, Sugaya Takeyoshi, Ishizuka Shogo	4. 巻 269
2. 論文標題 Comparison of polycrystalline and epitaxial Cu(In, Ga)Se2 solar cells with conversion efficiencies of more than 21%	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Solar Energy Materials and Solar Cells	6. 最初と最後の頁 112791 ~ 112791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.solmat.2024.112791	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 Ramirez Omar, Nishinaga Jiro, Dingwell Felix, Wang Taowen, Prot Aubin, Wolter Max Hilaire, Ranjan Vibha, Siebentritt Susanne	4. 巻 7
2. 論文標題 On the Origin of Tail States and Open Circuit Voltage Losses in Cu(In,Ga)Se2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solar RRL	6. 最初と最後の頁 2300054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/solr.202300054	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 Nagai Takehiko, Nishinaga Jiro, Tampo Hitoshi, Kim Shinho, Hirayama Kazuhiro, Matsunobe Tatsuo, Chen Guanzhong, Ide Yuya, Ishizuka Shogo, Shibata Hajime, Niki Shigeru, Terada Norio	4. 巻 14
2. 論文標題 Impacts of KF Post-Deposition Treatment on the Band Alignment of Epitaxial Cu(In,Ga)Se2 Heterojunctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 16780 ~ 16790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.1c21193	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 西永慈郎	4. 巻 181
2. 論文標題 分子線エビタキシー法によるIII-V、I-III-VI族化合物半導体の結晶成長	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 真空ジャーナル	6. 最初と最後の頁 13 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Abou-Ras Daniel, Nikolaeva Aleksandra, Krause Maximilian, Korte Lars, Stange Helena, Mainz Roland, Simsek Sanli Ekin, van Aken Peter A., Sugaya Takeyoshi, Nishinaga Jiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Optoelectronic Inactivity of Dislocations in Cu(In,Ga)Se2 Thin Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi Rapid Research Letters	6. 最初と最後の頁 2100042 ~ 2100042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssr.202100042	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 Nishinaga Jiro, Ishizuka Shogo	4. 巻 741
2. 論文標題 Effects of alkali-metal incorporation into epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> solar cells prepared by molecular beam epitaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 139034 ~ 139034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2021.139034	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 Nishinaga Jiro, Sugaya Takeyoshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Crystalline Characteristics of Epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> Layers on GaAs (001) Substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	6. 最初と最後の頁 2251-2257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC45281.2020.9300962	査読の有無 無
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 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Daniel Abou-ras, Jiro Nishinaga, Ulrike Bloeck, Henrik Prell, Sinju Thomas, Michael Tovar, Dan R. Wargulski, Harvey Guthrey, Pat Trimby, Aimo Winkelmann, Yukiko Kamikawa, Takeyoshi Sugaya, Shogo Ishizuka
2. 発表標題 Microstructure-property relationships in epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> solar cell absorbers
3. 学会等名 IEEE PVSC 50th (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daniel Abou-ras, Sinju Thomas, Dan Wargulski, Jiro Nishinaga
2. 発表標題 The role of grain boundaries and dislocations in various solar-cell materials on the corresponding device performance
3. 学会等名 Horizons symposium: Electronic & Energy materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西永慈郎、外川学、石塚尚吾
2. 発表標題 High radiation tolerance of 10um thick Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> diodes
3. 学会等名 第42回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西永慈郎
2. 発表標題 Widegap Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> エピタキシャル成長に関する考察
3. 学会等名 第52回結晶成長国内会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西永慈郎、上川由紀子、Daniel Abou-ras、石塚尚吾
2. 発表標題 高Ga組成Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> 太陽電池の結晶成長
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jiro Nishinaga
2. 発表標題 Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> detectors with high radiation tolerance
3. 学会等名 The 25th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Jiro Nishinaga, Manabu Togawa, Shogo Ishizuka,
2. 発表標題 Radiation tolerance of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> solar cells irradiated by proton beam
3. 学会等名 PVSEC-33, Nagoya (Japan) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Nishinaga
2. 発表標題 Chalcogenide semiconductor detector with high radiation tolerance
3. 学会等名 Physics in LHC and Beyond, Matsue (Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西永慈郎
2. 発表標題 Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> 太陽電池の放射線耐性
3. 学会等名 応用物理学会結晶工学分科会第156回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Nishinaga, Shogo Ishizuka
2. 発表標題 Effects of alkali-metal doping on epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> solar cells
3. 学会等名 E-MRS 2021 Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiro Nishinaga, Takeyoshi Sugaya
2. 発表標題 High efficiency epitaxial CIGS solar cells grown on p-type GaAs substrates
3. 学会等名 Virtual Chalcogenide PV Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西永慈郎
2. 発表標題 多元系化合物半導体ヘテロ構造の結晶成長
3. 学会等名 第12回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西永慈郎、石塚尚吾、上川由紀子、鯉田崇、柴田肇
2. 発表標題 Ag添加によるCu(In,Ga)Se <sub>2</sub> 太陽電池の高効率化
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西永慈郎
2. 発表標題 多元系化合物半導体ヘテロ界面の結晶成長
3. 学会等名 第49回日本結晶成長国内会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiro Nishinaga, Takeyoshi Sugaya
2. 発表標題 Crystalline and electrical properties of epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> layers on GaAs substrates
3. 学会等名 2020 IEEE PVSE-47 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西永慈郎、石塚尚吾
2. 発表標題 Epitaxial Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> 太陽電池のアルカリ金属添加効果
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 2020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			
ドイツ	Helmholtz-Zentrum-Berlin	RWTH Aachen		
ルクセンブルク	University of Luxembourg			