

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02783

研究課題名(和文) 光援用ナノプローブによる多元系半導体太陽電池中の光励起キャリアダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Investigation of photo-induced carrier dynamics in solar cells consisting of multinary compound semiconductors using photo-assisted nanoprobes

研究代表者

高橋 琢二 (Takahashi, Takuji)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20222086

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)：光照射ケルビン・プローブ・フォース顕微鏡(P-KFM)や光熱モード原子間力顕微鏡(PT-AFM)などの光援用ナノプローブ技術を開発・改良するとともに、それらを利用して、Cu(In,Ga)(S,Se)₂などの多元系化合物半導体太陽電池材料における光誘起キャリアのダイナミクス、特にそれらの再結合プロセスの解明を進めた。また、光容量AFM(PCap-AFM)を構築するための基礎となる多重周波数変調静電引力顕微鏡技術の開発を行い、同種太陽電池材料での実測を通じて、同手法の妥当性の確認を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの場合に微結晶系となる太陽電池用多元系化合物半導体に対して、局所計測が可能な光援用ナノプローブ技術を適用することによって、結晶粒界が光励起キャリアの再結合プロセスに与える影響などの微視的な知見を得るといった学術的な成果を上げた。また、それらの知見は、同種太陽電池の将来的な特性改善への貢献が期待されるといった社会的な意義も持っている。

研究成果の概要(英文)：Photo-assisted nanoprobe methods such as photo-assisted Kelvin probe force microscopy (P-KFM) and photothermal mode atomic force microscopy (PT-AFM) have been developed and improved. By means of them, in addition, photo-induced carrier dynamics, especially their recombination property, in solar cells consisting of multinary compound semiconductor like Cu(In,Ga)(S,Se)₂ have been investigated. Furthermore, the electrostatic force microscopy with multi-frequency bias modulation method which becomes a base of optical capacitance AFM (PCap-AFM) has been developed, and its validity has been confirmed through actual measurements on similar solar cells.

研究分野：ナノエレクトロニクスおよびナノ計測

キーワード：ナノプローブ 多元系化合物半導体 太陽電池 光励起キャリア 光起電力 再結合プロセス

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

低炭素社会の実現に向けて、太陽光エネルギーの活用が重要な役割を果たすことには言を俟たず、太陽電池に対してもさらなる特性の改善や製造コストの低減が望まれている。特に、Cu(In,Ga)Se₂ [CIGS] などの多元系化合物半導体は、直接遷移型半導体であることから薄膜化が可能であり、また、材料組成比の調整によってバンドギャップ E_g の制御も可能なため、低コストと高効率の両立が期待できる太陽電池材料として精力的に研究されており、すでに CIGS 系単一接合太陽電池にて多結晶シリコン太陽電池に匹敵する変換効率が達成されている。一方で、変換効率の理想値にはまだ及んでいないことから、更なる変換効率の改善のためには、これらの材料に対する物性面からの理解を深めることが重要であると考えた。特に、太陽電池は光励起された少数キャリアが重要な役割を果たすデバイスであり、例えば、キャリアの再結合が損失に直結するなど、少数キャリアのダイナミクスが変換効率を決める大きな要因となることから、その振る舞いを正しく理解することが重要である。また、太陽電池に使われる CIGS などは、通常、結晶粒サイズが 1 μ m 程度の微結晶系であり、多くの結晶粒やその粒界を内包していることから、結晶粒ごとの特性ばらつきをきちんと見極めることも必要である。さらに、非発光再結合中心として働く恐れのある欠陥や不純物、微結晶系材料固有の結晶粒界、などの存在が少数キャリアダイナミクスに与える影響を見極めることも非常に重要である。このような観点から、微視的な計測手法によって少数キャリアダイナミクスを多角的に解明することが有益であると考えた。

一方、本研究者らは、従前から、光援用ケルビン・プローブ・フォース顕微鏡 (P-KFM) 等を利用した局所的な光起電力分布の観測手法の開発に着手しており、CIGS 太陽電池においては、内蔵電界による光励起キャリアの空間分離効果が結晶粒界近傍での再結合を抑制している可能性を見出した。また、P-KFM での断続光励起時の光起電力を元にして光励起キャリアの再結合による減衰プロセスやその時定数を求める方法の開拓も進めてきた。さらに、本申請者らは、光励起キャリアの非発光再結合をもたらす試料の熱膨張を直接観測する光熱 AFM (PT-AFM) 法の開発にも取り組んでおり、CIGS 太陽電池上での光熱信号の観測にも成功している。このようなナノプローブ技術を応用・発展させることにより、前述のような太陽電池材料における少数キャリアダイナミクスの微視的解明につながるものと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、主に CIGS 系多元系化合物半導体太陽電池に対して、P-KFM や PT-AFM などの光援用ナノプローブ計測手法を適用し、光起電力およびその減衰特性の計測や非発光再結合特性の計測などを通じて、少数キャリアダイナミクスの理解を深めることを主たる目的とする。特に、光照射時の強度変調方式の工夫や、信号計測方式の工夫により、各特性の時間応答についての知見を得ることを目指す。また、周波数可変静電引力顕微鏡の導入により、表面空乏層容量とその周波数応答の計測を通じて、結晶粒界等に局在する可能性のある欠陥等に関する知見を得ることを目的とする。これらを通じて、主として材料物性面からの理解を深めることによって、同種太陽電池の高性能化を図るための指針を得ることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、各種光援用ナノプローブ計測手法を確立した上で、それらを CIGS のような多元系化合物半導体太陽電池材料へ適用し、少数キャリアの再結合プロセスや試料内移動プロセスなどの統合的解明、それらに対する欠陥・不純物の影響、変換効率のような太陽電池の基礎パラメータとの関連性の議論、などを行うとともに、各種信号の空間分布の可視化を通じて、結晶粒界の影響などを統合的に議論して、材料物性面からの理解を深化させることにより、高性能太陽電池を実現するための方策を探ることとした。以下、使用する手法ごとに研究方法を述べる。

(1) 光照射ケルビン・プローブ・フォース顕微鏡 (P-KFM)

表面電位計測が可能な KFM を光照射下で動作させる P-KFM を利用して、照射光の波長を変えた際の光起電力を計測することで、試料内での光励起キャリアの生成位置とその内部移動プロセスについて議論する。また、励起光を断続的に強度変調した際に観測される時間平均光起電力の変調周波数依存性から光励起キャリアの再結合に伴う光起電力の減衰プロセスを解析する。さらに、KFM の空間分解能を向上させる目的で本研究者らが独自に開発した間欠バイアス印加法に、ポンプ・プローブ手法を追加的に適用することによって、パルス的な光励起に対する光起電力の時間分解計測を行う。

これらの計測を通じて、CIGS 系のような微結晶系材料で重要となる結晶粒界とキャリア生成・再結合プロセスとの関連性や、CIGS 中の材料組成比に対する依存性を詳細に議論する。

(2) 光熱モード原子間力顕微鏡 (PT-AFM)

励起光を断続的に強度変調した際の光励起キャリアの非発光再結合に伴う試料の熱膨張量を周期的接触モードでの AFM カンチレバー振幅の変化から計測する PT-AFM において、PT 信号の空間分布から欠陥や不純物の空間分布を議論する。また、従来の PT-AFM では、単純なオン・オフでの光強度変調を使用していたのに対して、光の照射期間をさらに細かいパルス群に分割して、その分割数を変えた時の PT 信号の変化を観測する手法を新たに開発し、熱膨張と収縮の時定数の違いや、熱発生源となる非発光再結合中心の深さ分布に関する議論を進める。さらに、同手法を利用して、CIGS 系太陽電池の特性向上に効果があるとされるアルカリ処理が、具体的にどのような効果を持っているのか、といった点についても検討する。

(3) 可変変調周波数型静電引力顕微鏡による表面空乏層容量計測

導電性 AFM 探針と試料内部との間の静電容量に依存した静電引力信号を計測する静電引力顕微鏡 (EFM) において、複数の周波数の交流電圧を印加し、その差周波数のような高次成分を抽出することにより、カンチレバーの共振特性などに影響されない可変周波数変調を実現する新しい手法を開発する。この手法により、CIGS 系太陽電池で広く使われている CdS バッファ層と CIGS の界面特性などについて議論する。

4. 研究成果

(1) 光照射ケルビン・プローブ・フォース顕微鏡 (P-KFM)

通常、太陽電池に使用される CIGS は、内部の組成分布によって V 字型に傾斜した伝導帯構造を持ち、それに伴ってバンドギャップも変化するとされている。そこで、照射光の波長を変えることによって、光励起キャリアが生成される空間位置と計測される光起電力との関係を調べ (図 1)、また、その結果を簡単なシミュレーションと対比させることで、光励起キャリアの試料内移動現象についての解析を行った[1]。

また、Ga 組成の異なる CIGS 試料に対して、断続光照射下での P-KFM を利用して計測される時間平均光起電力と照射光波長や強度との関連性を詳細に調べることで、光励起キャリアの試料内移動プロセスや再結合プロセスについての理解を深めるとともに、Ga 組成の低い試料では、結晶粒界の不活性さが顕著であることを見いだした。このことは、CIGS が微結晶材料でありながら良好な太陽電池特性を示すという実験事実とよく一致を示している。それに対して、Ga 組成が高い試料では光誘起キャリアの再結合が促進され、それが太陽電池特性低下の一因となっている可能性も指摘した[2]。

さらに、間欠バイアス印加法にポンプ・プローブ手法を追加的に適用した P-KFM を利用して、光起電力の時間分解計測に取り組んだ。時間分解能を決める一つの要素となる間欠バイアス用パルスの時間幅を 2 マイクロ秒程度に設定することで、CIGS 系太陽電池において十マイクロ秒から数十マイクロ秒オーダーで上昇/減衰する光起電力信号の獲得に成功するとともに、特にその上昇時定数の長短が CIGS 太陽電池特性の良し悪しと関連付けられることを見出した[3]。

(2) 光熱モード原子間力顕微鏡 (PT-AFM)

CIGS 太陽電池で広く使われている CdS バッファ層を成膜する際に Cd 拡散によって形成されると考えられるドナー準位が、CIGS 層中での光励起キャリアの非発光再結合に対して与える影響を、PT-AFM を利用して検討し、CdS バッファ層の役割についての議論を深めた。

一方、CIGS 系太陽電池材料におけるアルカリ処理効果についても検証した結果、CdS バッファ層と CIGS 層との界面の不活性化にアルカリ処理が寄与していること、またその効果は結晶粒界近傍でより顕著で

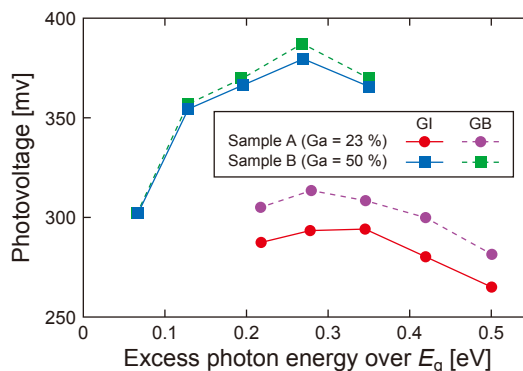


図 1. Ga 組成の異なる CIGS 太陽電池上で P-KFM により計測された光起電力の入射光子エネルギー依存性[2]

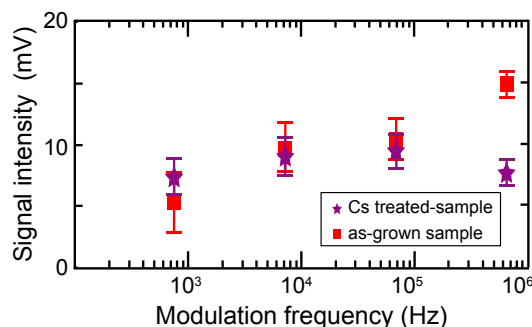


図 2 アルカリ処理後と未処理の CdS/CIGS 試料上での PT 信号強度の変調周波数依存性[4]

あること、などを明らかにした。

さらに、PT-AFM では、従来は単純なオン・オフでの光強度変調を使用していたのに対して、光の照射期間をさらに細かいパルス群に分割して、その分割数を変えた時の PT 信号の変化を観測する手法を新たに発案し、PT 信号の分割数依存性から熱膨張の発生源と試料表面との距離の関係を議論できることを示した。同手法を、アルカリ処理した CdS/CIGS 構造に適用し(図 2)、同処理が CdS と CIGS の界面の不活性化に有効であることを追確認した[4]。

(3) 可変変調周波数型静電引力顕微鏡による表面空乏層容量計測

交流バイアス誘起の探針-試料間静電引力に含まれる逡倍周波数成分の選択的抽出手法の新規構築に取り組んだ[5-10]。その結果、例えば、交流バイアスの 3 倍周波数をカンチレバーの 2 次共振周波数と同調させることによって、測定のス/N 比を向上できることを明らかにした。また、交流電圧信号の周波数を変えることが、計測される静電容量信号に対して重要な意味を持つことから、可変周波数での静電引力計測を可能にする二重バイアス変調法を新たに考案し、その

有効性を実験的に示すとともに、空乏層容量の電圧依存性の強弱を直接画像化する新手法の開発にも取り組んだ[6,7,9]。その結果、CIGS の結晶粒内と結晶粒界では、空乏層容量の電圧依存性に差異があり、特に、結晶粒界近傍にはバンドギャップ内の深い準位が高密度に分布している一方、CdS バッファ層堆積時に生じる Cd 拡散がそのような準位を不活性化している可能性があることを明らかにした[8]。

これらの成果は、光照射による表面空乏化を制御しながら静電容量を計測する光容量 AFM (PCap-AFM) を実現するための基礎となる。

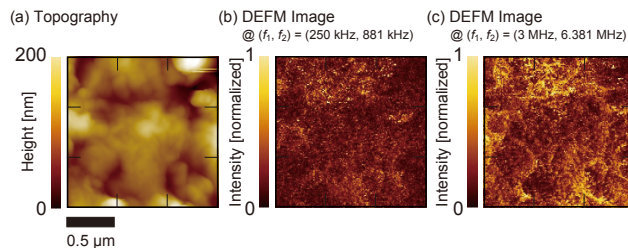


図 3 二重バイアス印加 EFM (DEFM) にて観測された CIGS 試料上で静電引力信号の変調周波数依存性[6]

<引用文献>

- 1) Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi: "Dependence of Photovoltage on Incident Photon Energies Investigated by Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells", *Proceedings of the 7th Edition of the World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)*, 1966-1969 (2018).
- 2) Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi: "Photovoltage Decay Measurements by Photo-Assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, **9**, 483-491 (2019).
- 3) Tomoe Kuroiwa, Ryota Ishibashi, and Takuji Takahashi: "Time-resolved Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells", *to be published in Japanese Journal of Applied Physics*
- 4) Ayaka Yamada and Takuji Takahashi: "Multi-pulse Modulation Method in Photothermal Atomic Force Microscopy for Variable Frequency Modulation of Incident Light", *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, SE1003 (2021).
- 5) Tomoaki Ishii, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi: "Local Measurements of Surface Capacitance by Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se₂ Materials", *Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)*, 0455-0458 (2017).
- 6) Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi: "Development of Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy for Variable Frequency Measurements of Capacitance", *Review of Scientific Instruments*, **91**, 023702 (2020).
- 7) Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi: "Direct Imaging Method of Frequency Response of Capacitance in Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy", *Japanese Journal of Applied Physics*, **59**, 078001 (2020).
- 8) Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi: "Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se₂", *Proceedings of 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 47)*, 0394-0396 (2020).

- 9) Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi: "Peak-tracking scanning capacitance force microscopy with multibias modulation technique", *Measurement Science and Technology*, 33, 065405 (2022).
- 10) Ryota Fukuzawa, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa, and Takuji Takahashi: "Quantitative capacitance measurements in frequency modulation electrostatic force microscopy", *to be published in Japanese Journal of Applied Physics*

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukuzawa Ryota, Takahashi Takuji	4. 巻 91
2. 論文標題 Development of dual bias modulation electrostatic force microscopy for variable frequency measurements of capacitance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 023702-023702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127219	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 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, Takuji Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Dependence of Photovoltage on Incident Photon Energies Investigated by Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)	6. 最初と最後の頁 1966-1969
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC.2018.8547957	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 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, Takuji Takahashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Photovoltage Decay Measurements by Photo-Assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Photovoltaics	6. 最初と最後の頁 483-491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOTOV.2018.2885835	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 Ishii Tomoaki, Minemoto Takashi, Takahashi Takuji	4. 巻 1
2. 論文標題 Local Measurements of Surface Capacitance by Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Materials	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	6. 最初と最後の頁 0455-0458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC.2017.8366110	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 -

1. 著者名 Yamada Ayaka, Takahashi Takuji	4. 巻 60
2. 論文標題 Multi-pulse modulation method in photothermal atomic force microscopy for variable frequency modulation of incident light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SE1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf07b	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 Fukuzawa Ryota, Minemoto Takashi, Takahashi Takuji	4. 巻 1
2. 論文標題 Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	6. 最初と最後の頁 0394-0396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC45281.2020.9300457	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 -

1. 著者名 Fukuzawa Ryota, Takahashi Takuji	4. 巻 59
2. 論文標題 Direct imaging method of frequency response of capacitance in dual bias modulation electrostatic force microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 078001-078001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9ae0	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 Fukuzawa Ryota, Takahashi Takuji	4. 巻 33
2. 論文標題 Peak-tracking scanning capacitance force microscopy with multibias modulation technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065405-065405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac5e62	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47件(うち招待講演 12件/うち国際学会 31件)

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dual Bias Modulation Method for Variable Frequency Measurements in Electrostatic Force Microscopy
3. 学会等名 The 21th International Scanning Probe Microscopy Conference (ISPM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy for Variable Frequency
3. 学会等名 NAMIS Marathon Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayaka Yamada and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Investigation on Non-radiative Recombination Property in Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ by Photothermal AFM
3. 学会等名 NAMIS Marathon Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Methods on Solar Cell Materials
3. 学会等名 The 8th LIA NextPV International Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Direct Imaging Method of Frequency Response in Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayaka Yamada and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Non-radiative Recombination Properties in Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ Investigated by Photothermal AFM
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM27) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy for Variable Frequency Analyses
3. 学会等名 The 4th International Symposium on "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Microscopy on Solar Cell Materials
3. 学会等名 Seoul National Univ.(SNU)/IIS, The Univ.of Tokyo Joint Woprkshop on Innovative Micro/Nano systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田綾果, 高橋琢二
2. 発表標題 光熱モードAFMによるCu(In,Ga)(S,Se) ₂ における非発光再結合特性の評価
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

1. 発表者名 福澤亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 二重バイアス変調静電引力顕微鏡による周波数応答の直接画像化
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

1. 発表者名 福澤亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 二重バイアス変調静電引力顕微鏡における可変周波数測定
3. 学会等名 第80回 応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福澤亮太, 峯元高志, 高橋琢二
2. 発表標題 二重バイアス変調静電引力顕微鏡によるCu(In,Ga)Se ₂ 上での局所的容量測定
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells under Light with Various Photon Energies
3. 学会等名 The 20th International Scanning Probe Microscopy Conference (ISPM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dependence of Photovoltage on Incident Photon Energies Investigated by Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells
3. 学会等名 The 7th Edition of the World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells
3. 学会等名 The 3rd international symposium on "Recent Trends in Elucidation and Function Discovery on Next Generation Functional Materials · Surface/Interface Properties" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells
3. 学会等名 CNRS GDR Thermal Nanosciences and Nano Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dual Bias Modulation in EFM for Vanable Frequency Measurements of dC/dV
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) & 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Valuable Frequency Measurements of dC/dV by Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)(S,Se) ₂
3. 学会等名 LIMMS-Next PV Joint Energy Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Methods on Solar Cell Materials
3. 学会等名 LIMMS-Next PV Joint Energy Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Risa Komatsu, Yasushi Hamamoto, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photothermal Measurements by AFM on Cu(In,Ga)Se ₂ Materials
3. 学会等名 International Scanning Probe Microscopy Conference (Kyoto 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photovoltaic Measurements on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells by Photo-assisted KFM under Various Illumination Conditions
3. 学会等名 International Scanning Probe Microscopy Conference (Kyoto 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoaki Ishii, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Local Measurements of Surface Capacitance by Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Materials
3. 学会等名 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hyeondeuk Yong, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-carrier Recombination Properties in Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells Investigated by Photo-assisted KFM under Various Illumination Conditions
3. 学会等名 25th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM25) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Risa Komatsu, Takashi Minemoto, and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photothermal-mode AFM on Cu(In,Ga)Se ₂ Materials
3. 学会等名 25th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM25) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Methods on Solar Cells
3. 学会等名 LIMMS/CNRS-IIS and UTC Joint Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa, Takashi Minemoto and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Dual Bias Modulation Electrostatic Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂
3. 学会等名 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 47) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Ishibashi and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Time-resolved Measurements by Kelvin Probe Force Microscopy with Intermittent Bias Application
3. 学会等名 2020 NAMIS Marathon Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ayaka Yamada and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Investigation on Non-radiative Recombination Local Property in Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ by Photothermal AFM
3. 学会等名 2020 NAMIS Marathon Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Ishibashi and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Time-resolved Kelvin Probe Force Microscopy with Intermittent Bias Application Method
3. 学会等名 The 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM28) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ayaka Yamada and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Multi-pulse Modulation Method in Photothermal Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 The 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM28) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Photo-assisted Scanning Probe Methods on Solar Cells
3. 学会等名 AMU/CNRS-IIS/UTokyo Energy Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuji Takahashi
2. 発表標題 Time-resolved Photovoltaic Measurements by Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy
3. 学会等名 The 4th International Symposium on "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Fukuzawa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Quantitative Capacitance Measurements in Frequency Modulation Electrostatic Force Microscopy
3. 学会等名 The 29th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM29) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoe Kuroiwa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Time-resolved Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells
3. 学会等名 The 29th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM29) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoe Kuroiwa and Takuji Takahashi
2. 発表標題 Time-resolved Photovoltaic Measurements on Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells by Photo-assisted Kelvin Probe Force Microscopy
3. 学会等名 2021 NAMIS Marathon Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田綾果, 高橋琢二
2. 発表標題 光熱モードAFMによる非発光再結合特性評価を通じたCu(In,Ga)(S,Se) ₂ に対するCs処理効果の検討
3. 学会等名 応用物理学会KOSEN Student Chapter 第1回VR学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福澤亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 二重バイアス変調静電引力顕微鏡における可変周波数静電容量測定
3. 学会等名 応用物理学会KOSEN Student Chapter 第1回VR学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋琢二
2. 発表標題 走査プローブ顕微鏡の基礎と応用
3. 学会等名 応用物理学会KOSEN Student Chapter 第1回VR学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 間欠バイアス印加ケルビンプローブフォース顕微鏡による時間分解計測
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 2020年

1. 発表者名 山田綾果, 高橋琢二
2. 発表標題 光熱モード AFM による非発光再結合局所分布計測を用いた $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ に対するCs処理効果の検討
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 2020年

1. 発表者名 福澤亮太, 峯元高志, 高橋琢二
2. 発表標題 導電性ナノプローブを用いた静電引力測定によるCu(In,Ga)Se ₂ 中のCd拡散効果の解析
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 2020年

1. 発表者名 福澤亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 二重バイアス変調静電引力顕微鏡による表面空乏層容量の可変周波数測定
3. 学会等名 日本学術振興会 ナノプローブテクノロジー第167委員会 第95回研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 時間分解計測のための間欠バイアス印加ケルビンプローブフォース顕微鏡
3. 学会等名 応用物理学会KOSEN Student Chapter 第2回VR学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田綾果, 高橋琢二
2. 発表標題 Multi-pulse変調を用いた光熱モードAFMによる非発光再結合の変調周波数依存性測定
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 黒岩朋恵, 高橋琢二
2. 発表標題 光照射ケルピンプローブフォース顕微鏡によるCu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池での時間分解光起電力計測
3. 学会等名 第82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 福澤亮太, 高橋琢二
2. 発表標題 三重バイアス変調によるピークトラッキング型走査キャパシタンスフォース顕微鏡法
3. 学会等名 第82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 山田綾果, 高橋琢二
2. 発表標題 Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ 太陽電池に対するCs処理効果の光熱モードAFMによる検討
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022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
連携研究者	峯元 高志 (Minemoto Takashi) (80373091)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	

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