

化合物半導体太陽電池の研究

Study of compound semiconductor solar cells

上川（清水）由紀子*

1. はじめに

この度、太陽光発電部会第34回セミナー「再生可能エネルギー分野で活躍する女性たち」(2022年8月2日開催)の講演記録も兼ね、本原稿を書かせて頂くことになりました。当日の発表同様に、これまでの研究経歴+αで、進路等で悩んでいる女子学生さん等に少しでも参考になれば嬉しく思います。決して成功例というような経歴を歩んでいる訳ではありません。これまでに、ダイバーシティ等に関して、色々な方とお話する機会もありましたが、多くの方が日々(性別等に関わらず)、悩みながら、七転び八起きで進まれていらっしゃるのだと感じています。私も、何とか諦めずに投げ出さずに続けてきた、といった方が正しいのかもしれませんが。

2. 学生時代

学生時代は工学系(筑波大学, 工学基礎学類)ということもあり、約130人の中で女性は7人だったと記憶しております。周囲は男性だらけの環境でしたが、皆さんもそうかもしれませんが、性別は全く関係ないとの意識で過ごしておりました。勉学をするにも大学院にて研究をするにも、気にすることは、

あまり多くはなかったような気がします。きっと将来は、色々なフェーズでも性別やその他の多様性による個々の違いを気にせずに過ごせるような世の中になってくるのだと期待します。研究に関しては、高校生の頃から、ニュース等でも取り上げられることの多かった、「環境問題」の解決に関わることに貢献したい、また、資源小国の日本を豊かにすることに関わりたいという2点が漠然とありました。大学に入ってから、授業の後に講師の先生にお話を伺ったり、研究室を見せて頂いたりしていました。有害物質を検知するセンサーのアイデア等、色々教えて頂いたりしました。その中で、大学院生の先輩方とお話しをしていて、専攻で勉強している半導体のpn接合が太陽電池なのだと思って以降興味を持ち、4年生から太陽電池の研究室で研究させて頂くこととなりました。

3. III-V 族化合物半導体太陽電池の研究

III-V 族化合物半導体(GaAs, InAs 等に代表される半導体)の太陽電池や量子ドット等の研究を行っている研究室で研究をさせて頂きました。こちらの研究室に所属する女子学生は、私が第一号とのことでした。ここでは、タンデム型太陽電池に向けたヘテロ接合(異種材料間の接合)の形成や材料開発等のテーマに取り組みました。卒業研究および修士論文で取り組みましたのは、Si基板等の上にIII-V族化合物を成膜する研究でした。図1に当時研究をしておりましたSi基板上GaAs太陽電池の構造例¹⁾を示します。本誌の読者層のご専門は私の研究とは異なるとのことなので、詳細な説明は割愛させて頂きますが、異種材料を接合させた場合に生じる、①結晶構造差起因、②熱特性(膨張係数)差起因の欠

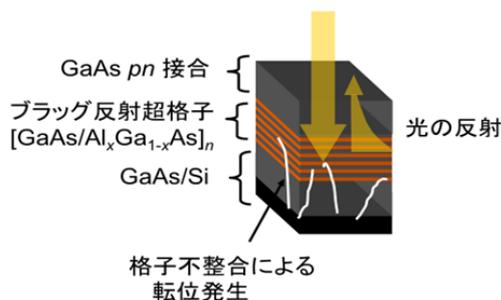


図1 Si基板上GaAs太陽電池の構造例

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

陥をいかに低減し、良質な接合を形成するかという研究でした²⁾。超格子構造を導入することで格子不整合により発生する転位の伝搬を抑制するとともに、超格子構造での光の反射も活用し実効的光路長を増加させる試みでした。大学院での研究では、分子線エピタキシー (MBE) 装置をオペレーションして、結晶成長を行い、主にデバイスおよび薄膜の2構造の試料の特性評価および結晶品質等の分析・解析を行うという流れでした。ここで学ばせて頂いた結晶成長の基礎、成膜・分析装置の取り扱いはその後の研究の基礎となりました。研究活動の中で、狙った通りの結果が出た時は本当に嬉しかった記憶があります。ただ、上手いかなく落ち込むことの方が多かったような気がします。「研究活動の9割以上は苦しい時間で、残り1割ほどの嬉しい出来事や達成感に励まされて、皆頑張っているのではないかな。」と先輩に教えて頂いたこともあります。本当にそうだとつくづく思います。

大学院の後半、博士論文のテーマは、多接合型太陽電池向けの材料開発でした。現在も盛んに研究が行われていますが、単一材料の太陽電池の理論限界効率率は30%程度であるのに対し、複数材料を組み合わせると、理論限界効率率が大幅に向上します(40%以上等)。図2に当時想定していた多接合型太陽電池構造(左)3接合、(右)4接合太陽電池を示します。先述のGaAs/Siの接合の研究もこのような最終構造を想定した研究の一環でした。4接合太陽電池の作製に必要とされていた、バンドギャップが1eVの材料の候補として希薄窒化物(GaInNAs)に着目しました。固溶度の低い(溶け込みにくい)窒素(N)を結晶に導入すると、結晶の乱れや欠陥発生等の様々な問題が生じるため、結晶の成長モードをコントロールするために原子状水素(H)を結晶成長中に導入する研究を行っておりました。電子線の回折を用いて、その場で結晶の表面状態を観察で

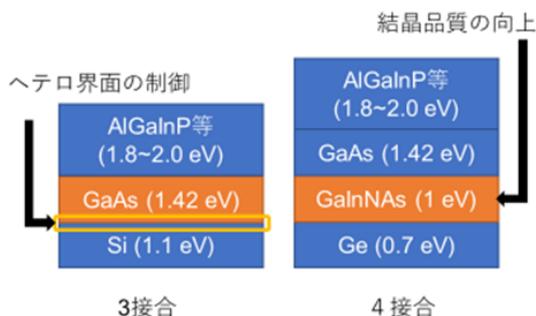


図2 当時想定していた多接合型太陽電池構造 (左)3接合、(右)4接合太陽電池

きるのは、エピタキシャル成長の面白さでありました。観察例を図3に示します。結晶が理想的な二次元的な成長する際には反射高速電子線回折(RHEED)の振動がきれいに見えます。図3の例では、原子状水素照射ありの条件では振動が良く見える一方、照射なしの条件では結晶成長の乱れによる強度低下が顕著でした。このように、結晶成長の様子を判断していました。原子状水素照射の利点もある一方、照射量が過剰になると水素が関係する欠陥の形成等の問題も生じました。博士論文では、原子状水素照射の効果を軸に欠陥の形成等に関する研究結果をまとめました²⁻⁵⁾。

余談ですが、博士課程に進むことは、両親も心配だったようで、全面的な賛同は得られず、別の道を進められておりました。私としては、どうしても諦められなくて、博士課程の学費を自分で奨学金等にて工面することで、自由にさせて頂きました。当時は心配をしていた両親も、博士号を無事に取得し、賞を頂いて盾を持って帰った際には、ホッとしたようで、一緒に喜んでくれました。今は、研究者として仕事をしている私を応援してくれています。また、大学院在籍中、指導教官が産総研の女性研究者の方と、お話しできる機会をアレンジして下さいました。その女性研究者の方は、赤ちゃんと小学生のお兄ちゃんを連れて、お休みの日に私とお話しをする時間を作ってくれました。「大変なこともあるけれど、何とか頑張っていますよ。」とのことをお伺いしました。女性研究者の方が私の周囲にはおりませんでしたので、とても勇気づけられました。この方は、今同じ職場にいらっしゃって、時々お目に掛かれます。あの時は有難うございましたと、同じ研究者になってから伝えられたのは嬉しい経験でした。

4. フランス短期留学

大学院在籍中には、一度フランスのグルノーブルに短期交換留学(4か月)に行く機会を頂きました。

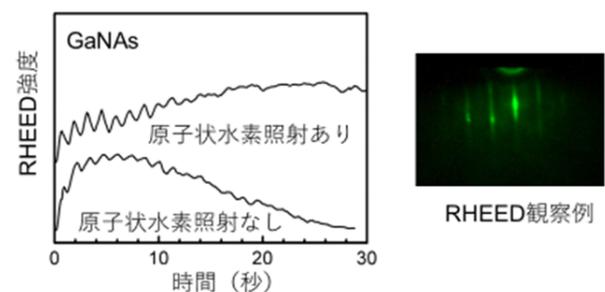


図3 (左) RHEED 振動の観察例 (右) RHEED パターンの観察例

ここでは ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) の放射光施設のイタリアのグループが管理していたビームラインに滞在させて頂きました。田舎であったこともあり、街中では期待していたほど英語を話す方がいらっしやらないので、街に出るとフランス語、昼間の研究現場ではイタリア語が飛び交っておりました。日本では国際交流のサークル活動をしていたので、海外の方との交流はしてきたつもりでいましたが、実際に生活するとなると英語力さえも足りていないことを痛感し、語学には大変苦勞をしました。帰国後には、英会話スクールにすぐに足を運びました。スクールの先生には、「普通は留学前に来るのだけれどね…」と苦笑いをされました。短期留学中は、ESRF にて、EXAFS (広域 X 線吸収微細構造) 解析に関して、色々と教えて頂きながらお手伝いをし、Si 中へのインジウムと炭素 (In - C) の共ドーピングに関する研究のお手伝いをさせて頂きました。論文発表の際には共著者に名前を入れて頂いて⁶⁾とても嬉しかった記憶があります。ビームラインの上司はイタリア人の Francesco D'Acapito さんでした。とてもお忙しい方でしたが、データの解析を進めたものを整理しておき、時間を取って頂けるときに、まとめて報告をし、アドバイスももらっていました。彼を含めて周囲の方が“Yukiko!”とフレンドリーに呼んでくれることも新鮮でしたが、Francesco さんと解析に関する議論をしている中で、些細なことでしたが私が異論を提案した際に、“Yukiko, you are right!”と明るく褒めて下さったことをとても新鮮に覚えております。この短期留学後には、以前よりも自分の意見をしっかりと表明するように心がけるようになった気がします。滞在期間最後に希薄窒化物の EXAFS も自分で測定させて頂いたのですが、残念ながら綺麗な結果には

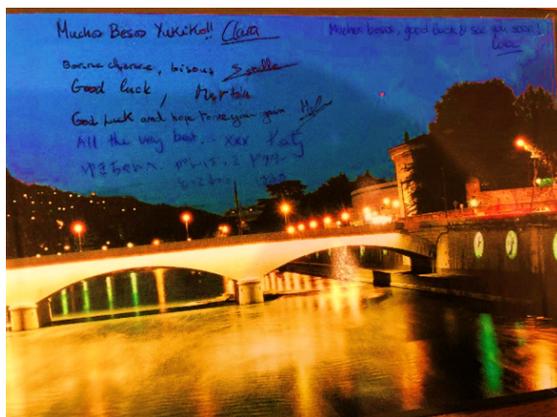


図4 帰国の際に友人達から頂いたメッセージとグルノーブルの夜景の写真

なりません。当時の研究室の皆さまには申し訳なかったです。この短期留学では、色々な方に出会えたことや、日本を外から眺める良い機会にもなり、本当に良い経験をさせて頂いたと感謝しております。

5. オーストラリア在外研究

博士課程を修了した後は、産業技術総合研究所(産総研)で研究をさせて頂きました。途中で2年程、オーストラリアのニューサウスウェールズ大学(UNSW)にて在外研究をさせて頂きましたので、先にその話を書かせて頂きます。機会があり、UNSW にて第3世代太陽電池の一つであるホットキャリア太陽電池の研究に参加させて頂きました。太陽電池の中の大きな損失の一つは熱損失です。バンドギャップよりも大きなエネルギーをもったフォトン(光子)のエネルギーを吸収し励起されたキャリア(電子・ホール)の余剰エネルギーは、格子振動の形で結晶内に分散されてしまい、回収不可能なエネルギーになってしまいます。タンデム・多接合型太陽電池が高効率である理由も、この熱損失の低減によるものです。バンドギャップと吸収する光のエネルギー差を低減することで、熱損失を低減しています。UNSW では、フォノンのエンジニアリングによって熱損失を低減する試みに取り組んでいました。図5にフォノン緩和例の概念図を示します。縦波光学(LO)フォノンが2個の縦波音響(LA)フォノンに緩和するパスを描いております。前者は定在波に近く空間的に分散しないのに対し、後者は伝搬して分散してしまい、エネルギー回収(フォノンからキャリアへのエネルギー伝搬)が困難になってしまうという考え方でした⁷⁾。このLO→2LAの緩和過程を低減するために、フォノンバンドに広いキャップを形成することを目指し、色々な検討がなされておりました。私は、ナノ構造の活用を検討⁸⁾されていた、Robert Patterson さん[図6(左)]らと共に、ナノ構造中のフォノンバンドの計算結果と実際の測定結果についての比較検討に取り組みました。比較検討結果については、なんとか一報論文発表⁹⁾に繋がりました。自分でも理論計算にも挑戦も致しましたが、論文に用いれるようなレベルにまでは残念ながら到達出来ませんでした。量子構造中の波動関数を解く計算等も行いましたが、同写真の Binesh Veetil さんの、量子ドットの形状を非常に正確に再現した正確な計算結果には程遠く、結局は自分の勉強だけで終わってしまいました。理論計算

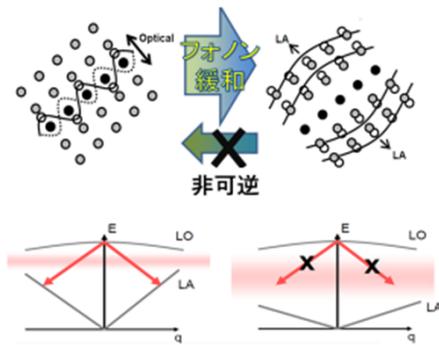


図5 フォノン緩和例の概念図

Robertさん

Bineshさん



図6 (左) UNSW の同僚との写真、
(右) ジャカラダの花びらの中で娘との写真

をされている方の日々の苦労も良く分かった滞在期間でした。皆さんのプログラムを読ませて頂いたりして、勉強をさせて頂いたこともあり、簡単な計算やプログラムは、その後の研究では少しずつ取り入れていけるようになりました。

出産・育児休暇も一部この時期に重なっております。図6(右)は、オーストラリアで春に見られるジャカラダの木の下で、花びらの中で撮った娘との写真です。この頃は、海外での子育てや、頻繁に熱を出す子供の対応で、研究に思うように比重を置けない時期もあり葛藤もありました。やはり、出産・育児休暇の分+ a 、周囲の同年代の研究者との差もかなり開いたかなというのが、当時の感覚でした。子供の寝かしつけの際に、横に教科書を置いておいて、子供が寝た少しの時間で少しずつ教科書を読み進めたり、2人目の出産の際には、病院で2日目からは計算式を解いたりしていました。本当に少しの時間でしたが、精神衛生上、少しは良かったような気がします。乳児の子育てには、やはりコツがあるので、理系向けの良い本¹⁰⁾に出合った後は少し楽になりました、必要な方は是非読んでみて下さい。

6. 産総研での CIGS 太陽電池の研究

さて前後しますが、大学院卒業後の主な期間、産総研にて Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) の太陽電池の研究をさせて頂きました、この CIGS 太陽電池の話 最後にさせて頂きたいと思います。当時、産総研には太陽光発電に関するセンターがあり、色々な材料の太陽電池、システム、光触媒等様々な分野の研究者が所属されていらっしゃいました。同センターの成果報告会に参加したのをきっかけに、こちらで研究をさせて頂くことになりました。幼児を抱えたポスドクの期間もありました。この期間は特に、実験に穴をあけられないプレッシャーもあり、子供が熱を出したりすると病院受診後は早急に病児保育や出

張乳母サービス、もしくは実家の母にお願いして、出来る限り休まずに実験のやりくりをしました。ある日、娘が高熱を出した際に、今回ばかりは休むかかないかと思っていた時、私の背中でごっったりしていた娘が、「ママ、今日は、私はどこに行くの?」と尋ねるのを聞いて、なんだが涙が出てしまった記憶があります。私は、「今日は、ママとずっと一緒にいようね。」と答えました。苦労もありましたが、後に念願叶って同研究所の採用試験にも合格をしました。チームの忘年会等には娘らも一緒に参加したこともあり、チームの皆さまにも可愛がって頂きました。最近、成長した娘が職場の方に再会した際には、以前お絵かき遊びをさせてもらったこと等、娘本人、お礼を伝えておりました。

さて、研究の話に戻ります。CIGSは銅 (Cu)、インジウム (In)、ガリウム (Ga)、セレン (Se) から成る多元系材料材料です。光吸収係数も高く、光吸収としては $1\ \mu\text{m}$ 程度の膜厚で十分と報告¹¹⁾されています。しかし、裏面界面での再結合¹²⁾を低減するために余分に膜厚が必要となり、約 $2\ \mu\text{m}$ 程度の光吸収層膜厚を確保したデバイス構造が一般的です。図7(上)にデバイスの断面 SEM (走査電子顕微鏡) 像を示します。光吸収層とその他の電極層等を合わせても数 μm と薄いデバイス構造になっております。図7(下)に原料の利用効率 100% の理想的な仮定において、 20m^2 の太陽電池を作製するのに必要な、原料の量を示しております。それぞれ数 10g ~ 100g 程度と非常に少ない原料で、3kW 以上の太陽電池が理論上は可能になります (実際の成膜では、Se 等は特に、原料の使用効率は低くなってしまいますので改善が必要です)。太陽電池に用いられる CIGS は一般的には多結晶です [図7(上)参照]。そのため、基板と CIGS との結晶構造等が合致している必要はなく、基板には、非晶質なガラスやポリイミド等の高分子材料も用いることができます。こ



図7 (上) CIGS 太陽電池の断面 (SEM 観察像)
(下) 20 m² の CIGS 分の原料
(原料使用効率 100% 仮定)

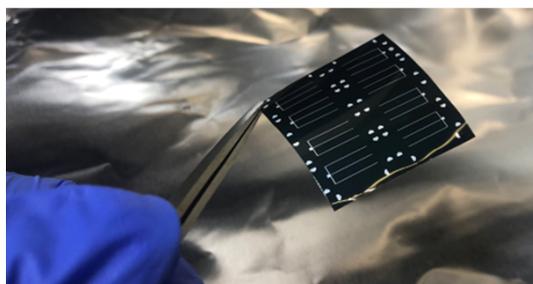


図8 フレキシブル CIGS 太陽電池の例
[基板: ポリイミド (25 μm)]

の点は、近年活発に研究が行われているペロブスカイト系太陽電池も同様です。軽量性やフレキシブル性を有した基板を用いることで、軽量化・フレキシブル化が可能である点は優位点の一つだと考えられます。図8に基板にポリイミドフィルム (25 μm) を用いた場合のフレキシブル太陽電池の例を示します。ポリイミドフィルムは耐熱性が高い (400°C 台) ものもあり、CIGSの基板等としても活用されています^{13, 14)}。CIGSは多元系材料ということもあり、複数の固有欠陥が共存しバランスを保っており¹⁵⁾、デバイス特性向上にも寄与するイオン (Na⁺等)¹⁶⁾ も含有されています。総合的な欠陥の挙動は未解明の部分も多いですが、高い放射線耐性¹⁷⁻¹⁹⁾ や光照射下での高い長期安定性を有する²⁰⁾ 等、材料としての安定性の高さも特徴の一つです。また、図9に1つの基板の上に複数のセルを直列接続に集積化したミニモジュールの例²¹⁾を示します。集積構造では表面グリッド電極が不要です。CIGS太陽電池は表面反射が少なく、黒っぽい色をしていますので、特にグリッド電極が無い表面は一様に黒色で意匠性も高いです。CIGS太陽電池をカラーフィルム等で着

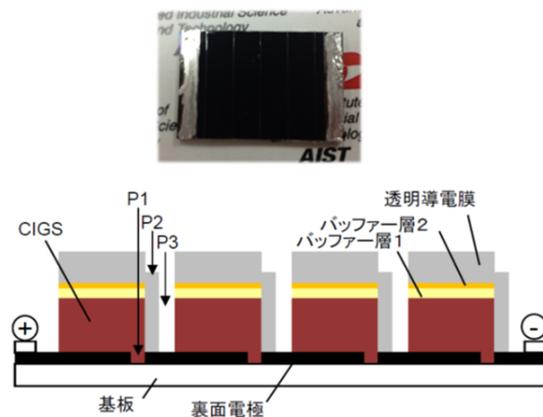


図9 (上) CIGS 太陽電池ミニモジュール
(下) 集積化構造概略図

色をする試み²²⁾もあります。3章ではIII-V族化合物半導体のタンデム・多接合型太陽電池の研究の紹介を致しましたが、CIGSでも近年、ペロブスカイトトップセルとCIGSボトムセルの組み合わせ²³⁾や、III-V族化合物半導体のトップセルとCIGSボトムセル^{24, 25)}の組み合わせ²⁶⁾、CIGS系材料同士の組み合わせ²⁷⁾等の色々な構造でタンデム・多接合型太陽電池の研究が進められており、更なる高効率化に向けて今後の展開が期待されます。

近年、太陽電池は建材やモビリティ等に組み込まれ、一つの素材としての要素が高くなっているように思います。意匠性と性能、素材としての特性を兼ね備える発電する素材として、太陽電池を組み込む建物や製品等の総合的な設計やデザイン性の付加価値向上につながるものと期待しています。

7. 最後に

これまでの太陽電池を中心とした研究経歴 + α を、思いつくままに書かせて頂きました。拙い文章で恐縮ですが、少しでも何かの参考になれば幸いです。また、これまでの研究の中では周囲の多くの方々に助けて頂き、また色々なことを教えて頂きました。この場をお借りして心より感謝を申し上げます。また、末筆ではございますが、皆さまの今後のご活躍をお祈りしております。

参考文献

- 1) Y. Shimizu and Y. Okada, Growth of high-quality GaAs/Si films for use in solar cell applications, *Journal of Crystal Growth*, **265**, 99-106 (2004).

- 2) Y. Shimizu, N. Kobayashi, A. Uedono, and Y. Okada, Improvement of crystal quality of GaInNAs films grown by atomic hydrogen-assisted RF-MBE, *Journal of Crystal Growth*, **278**, 553-557 (2005).
- 3) Y. Shimizu, Y. Mura, A. Uedono, and Y. Okada, Defects in Ga (In) NAs thin films grown by atomic H-assisted molecular beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, **100**, 064910 (2006).
- 4) Y. Shimizu, N. Miyashita, Y. Mura, A. Uedono, and Y. Okada, Effect of growth temperature on the properties of Ga (In) NAs thin films by atomic hydrogen-assisted RF-MBE, *Journal of Crystal Growth*, **301-302**, 579-582 (2007).
- 5) Y. Kamikawa-Shimizu, S. Niki, and Y. Okada, Fabrication of homojunction GaInNAs solar cells by atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **93**, 1120-1123 (2009).
- 6) F. d'Acapito, Y. Shimizu, S. Scalese, M. Italia, P. Alippi *et al.*, Experimental determination of the local geometry around In and In-C complexes in Si, *Applied Physics Letters*, **88**, (2006).
- 7) G. J. Conibeer, D. König, M. A. Green, and J. F. Guillemoles, Slowing of carrier cooling in hot carrier solar cells, *Thin Solid Films*, **516**, 6948-6953 (2008).
- 8) R. Patterson, M. Kirkengen, B. Puthen Veettil, D. König, M. A. Green *et al.*, Phonon lifetimes in model quantum dot superlattice systems with applications to the hot carrier solar cell, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94**, 1931-1935 (2010).
- 9) Y. Kamikawa-Shimizu, R. Patterson, A. Milekhin, K. Akahane, Y. Shoji *et al.*, Study of phonons in self-assembled InAs quantum dots embedded in an InGaAlAs matrix, *Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **57**, 1-5 (2014).
- 10) ジーナ・フォード, カリスマ・ナニーが教える赤ちゃんとおかあさんの快眠講座, 朝日新聞出版
- 11) T. Hara, T. Maekawa, S. Minoura, Y. Sago, S. Niki *et al.*, Quantitative assessment of optical gain and loss in submicron-textured $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ solar cells fabricated by three-stage coevaporation, *Physical Review Applied*, **2**, (2014).
- 12) Y. Kamikawa, M. Nardone, J. Nishinaga, H. Shibata, and S. Ishizuka, Assessing the impact of back-contact recombination on CIGS solar cells with improved crystal quality, *Proceedings of IEEE PVSC46* (2019).
- 13) A. Chirila, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A. R. Uhl *et al.*, Potassium-induced surface modification of Cu (In,Ga) Se_2 thin films for high-efficiency solar cells, *Nature Materials*, **12**, 1107-1111 (2013).
- 14) Y. Kamikawa, T. Masuda, J. Nishinaga, and S. Ishizuka, Influence of argon pressure on sputter-deposited molybdenum back contacts for flexible Cu (In,Ga) Se_2 solar cells on polyimide films, *Solar Energy*, **241**, 327-334 (2022).
- 15) S. B. Zhang, S.-H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, Defect physics of the CuInSe_2 chalcopyrite semiconductor, *Physical Review B*, **57**, 9642-9656 (1995).
- 16) Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, T. Tayagaki, H. Guthrey *et al.*, Effect of thermal annealing on the redistribution of alkali metals in Cu (In,Ga) Se_2 solar cells on glass substrate, *Journal of Applied Physics*, **123**, (2018).
- 17) S. Kawakita, M. Imaizumi, S. Ishizuka, S. Niki, S. Okuda *et al.*, Influence of electrical performance on Cu-related defects generated by 250 keV electron irradiation in Cu (In, Ga) Se_2 thin-film solar cells, *Thin Solid Films*, **535**, 353-356 (2013).
- 18) S. Kawakita, M. Imaizumi, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki *et al.*, Influence of electron irradiation on electroluminescence of Cu (In,Ga) Se_2 solar cells, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, (2014).
- 19) S. Kawakita, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Kushiya, T. Ohshima *et al.*, Super radiation tolerance of CIGS solar cells demonstrated in space by MDS-1 satellite, *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (2003).
- 20) J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Takahashi *et al.*, Effects of long-

- term heat-light soaking on Cu (In,Ga) Se₂ solar cells with KF postdeposition treatment, *Applied Physics Express*, **10**, (2017).
- 21) Y. Kamikawa-Shimizu, H. Komaki, A. Yamada, S. Ishizuka, M. Iioka *et al.*, Highly Efficient Cu (In,Ga) Se₂ Thin-Film Submodule Fabricated Using a Three-Stage Process, *Applied Physics Express*, **6**, (2013).
- 22) T. Masuda, S. Hirai, M. Inoue, J. Chantana, Y. Kudo *et al.*, Colorful, flexible, and lightweight Cu (In,Ga) Se₂ solar cell by lift-off process with automotive painting, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **8**, 1326-1330 (2018).
- 23) M. Jošt, L. Kegelmann, L. Korte, and S. Albrecht, Monolithic perovskite tandem solar cells : a review of the present status and advanced characterization methods toward 30% Efficiency, *Advanced Energy Materials*, **10**, (2020).
- 24) K. Makita, Y. Kamikawa, H. Mizuno, R. Oshima, Y. Shoji *et al.*, GaAs//CuIn_{1-y}Ga_ySe₂ three-junction solar cells with 28.06% efficiency fabricated using a bonding technique involving Pd nanoparticles and an adhesive, *IEEE Journal of Photovoltaics*1-7 (2021).
- 25) Y. Kamikawa, J. Nishinaga, H. Shibata, and S. Ishizuka, Efficient narrow band gap Cu (In,Ga) Se₂ solar cells with flat surface, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **12**, 45485-45492 (2020).
- 26) K. Makita, Y. Kamikawa, H. Mizuno, R. Oshima, Y. Shoji *et al.*, III-V//Cu_xIn_{1-y}Ga_ySe₂ multijunction solar cells with 27.2% efficiency fabricated using modified smart stack technology with Pd nanoparticle array and adhesive material, **29**, 887 (2021).
- 27) J-H. Wi, W. S. Han, W.-J. Lee, D.-H. Cho, H.-J. Yu *et al.*, Spectral Response of CuGaSe₂/Cu (In,Ga) Se₂ Monolithic Tandem Solar Cell With Open-Circuit Voltage Over 1 V, *IEEE Journal of Photovoltaics*1-9 (2018).

著者略歴



上川 由紀子（かみかわ ゆきこ）

2007年3月 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 5年一貫制博士課程修了。博士（工学）。The University of New South Wales（豪州）JSPS海外特別研究員，国立研究開発法人産業技術総合研究所 博士型研究員等を経て，同研究所 主任研究員，主な受賞は，応用物理学会 女性研究者研究業績・人材育成賞（小舘香椎子賞）