

Oral presentation | 13 Semiconductors : 13.9 Compound solar cells

📅 Wed. Sep 18, 2024 1:00 PM - 6:45 PM JST | Wed. Sep 18, 2024 4:00 AM - 9:45 AM UTC 🏛️ B1
(Exhibition Hall B)

[18p-B1-1~20] 13.9 Compound solar cells

Kentaroh Watanabe(Univ. of Tokyo), Tamotsu Okamoto(Natl. Inst. of Tech., Kisarazu Col.)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[18p-B1-1]

Investigation of “optoiontronic carrier dynamics” during water splitting using CIGS photoelectrode

○Kana Ueda¹, Mutsumi Sugiyama^{1,2} (1.Tokyo Univ. Sci., 2.RIST)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[18p-B1-2]

Deposition of (In,Ga)₂S₃ Thin Films via Mist-CVD Method

○Yohei Araki¹, Akihiro Funaki¹, Takahito Nishimura¹, Akira Yamada¹ (1.Tokyo Tech.)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[18p-B1-3]

Development of integrated Zn-Ge-O n-layer for CIGSe solar cells

○YUTARO YAMADA¹, Yota Suzuki¹, Takahito Nishimura¹, Akira Yamada¹ (1.Tokyo Tech.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[18p-B1-4]

Structural design of CIGSe optical absorption layer by Bayesian Optimization

○Ryuki Kasai¹, Akihiro Funaki¹, Takahito Nishimura¹, Akira Yamada¹ (1.Tokyo Tech.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[18p-B1-5]

Surface electronic structure of Mo-back electrode in CIS-based solar cells

○Motoya Oba¹, Yukiko Kamikawa², Takehiko Nagai², Shogo Ishizuka², Jiro Nishinaga², Hitoshi Tampo², Masami Aono¹, Tetsuji Okuda¹, Norio Terada^{1,2} (1.Kagoshima Univ., 2.AIST.)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[18p-B1-6]

Two-step photon up-conversion solar cells using a MAPbI₃/Si heterostructure

○(M2)Shunya Tokunaga¹, Ryohei Onitsuka¹, Shigeo Asahi¹, Takashi Kita¹ (1.Kobe Univ.)

🎤 Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award 🎤 English Presentation

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[18p-B1-7]

Intraband Transitions Induced by Below-Bandgap Photoexcitation at CsPbBr₃/GaAs Heterointerface

○(DC)Hambalee Mahamu¹, Shigeo Asahi¹, Takashi Kita¹ (1.Kobe Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[18p-B1-8]

Gain characteristics of intraband infrared optical transition induced by Quantum Dots in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells

○(M2)sho yamamoto¹, daichi nagai¹, shigeo asahi¹, takashi kita¹ (1.Kobe Univ.)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[18p-B1-9]

Theoretical power density of thermoradiative diode with an intermediate band (II)

○Yukihiko Harada¹, Takashi Kita¹ (1.Kobe Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[18p-B1-10]

Dual-Wavelength Laser Power Converters Compatible with Solar Cells Using Triplet-Triplet Annihilation and Singlet Fission of Molecular Systems

○Yasuhiko Takeda¹ (1.Toyota Central R&D Labs.)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[18p-B1-11]

Investigation of the optical loss of InGaN solar cells for optical wireless power transmission

○Junichi Suzuki¹, Ryusei Takahashi¹, Yuto Kaneko¹, Reo Aoyama¹, Masahiro Koga¹, Shunsuke Shibui¹, Takahiro Noguchi¹, Shunki Hayashi¹, Takahiro Fujisawa², Shiori Ii³, Ruka Watanabe³, Toshihiko Fukamachi⁴, Koichi Naniwae⁴, Makoto Miyoshi², Tetsuya Takeuchi³, Satoshi Kamiyama³, Shiro Uchida¹ (1.Chiba Inst, 2.Nagoya Inst, 3.Meijo Univ, 4.Ushio Inc)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[18p-B1-12]

Temperature characteristics of InGaP solar cells with DBR structure for optical wireless power transmission

○Ryusei Takahashi¹, Junichi Suzuki¹, Shunsuke Kawamura¹, Kouichi Akahane², Shiro Uchida¹ (1.Chiba Inst., 2.NICT)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[18p-B1-13]

Temperature dependency of 3-junction InGaAs solar cells for optical fiber power transmission

○Reo Aoyama¹, Junichi Suzuki¹, Moeka Chiba¹, Shunsuke Shibui¹, Kosuke Watanabe¹, Ryota Warigaya¹, Kouichi Akahane², Shiro Uchida¹ (1.Chiba Institute of Technology, 2.National Institute of Information and Communications Technology)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[18p-B1-14]

Fabrication of patterned dielectric back contacts for InGaAs thermophotovoltaic cells

○Masaki Date^{1,2}, Ryuji Oshima², Yasushi Shoji², Hitoshi Sai², Makoto Shimizu³, Takeyoshi Sugaya², Shuhei Yagi¹, Hiroyuki Yaguchi¹ (1.Saitama Univ., 2.AIST, 3.Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[18p-B1-15]

Study on Radiation Degradation of Electron-Induced Current in an InGaP Solar Cell Type Gamma-ray Dosimeter

○Mitsuru Imaizumi¹, Tetsuya Nakamura², Yasuki Okuno³ (1.Sanjo City Univ., 2.JAXA, 3.RIKEN)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[18p-B1-16]

Reducing bonding resistance between dissimilar semiconductor substrates using RTWB

○Shuntaro Fujii¹, Reo Aoyama¹, Yuta Nishidate¹, Moeka Chiba¹, Shuto Fujiwara¹, Keigo Saito¹, Ryuga Kikuchi¹, Kosuke Watanabe¹, Kouichi Akahane², Shiro Uchida¹ (1.Chiba Inst., 2.NICT)

◆ English Presentation

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[18p-B1-17]

Electrical properties of wafer-bonded interfaces applicable for multijunction p-on-n solar cells

○Hassanet Sodabanlu¹, Depu Ma², Kentaroh Watanabe¹, Yoshiaki Nakano², Masakazu Sugiyama^{1,2} (1.RCAST, UTokyo, 2.School of Eng., UTokyo)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

6:00 PM - 6:15 PM JST | 9:00 AM - 9:15 AM UTC

[18p-B1-18]

Efficiency enhancement of InGaP/GaAs/In_xGa_{1-x}As//In_yGa_{1-y}As four-junction solar cells by improving current mismatch

○(M2)Takashi Shimasaki¹, Kentaroh Watanabe², Hassanet Sodabanlu², Yoshiaki Nakano¹, Masakazu Sugiyama^{1,2} (1.The Univ. of Tokyo, 2.RCAST)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

6:15 PM - 6:30 PM JST | 9:15 AM - 9:30 AM UTC

[18p-B1-19]

Dependence of diode's ideality factor on incident light intensity in solar cells

○Meita Asami¹, Kentaroh Watanabe¹, Yoshiaki Nakano², Masakazu Sugiyama^{1,2} (1.RCAST, 2.The Univ. of Tokyo)

6:30 PM - 6:45 PM JST | 9:30 AM - 9:45 AM UTC

[18p-B1-20]

Anisotropic etching and annealing for germanium-on-nothing structure

○(M2)Wenbo Fan¹, Ryuji Oshima², Yasushi Shoji², Takeyoshi Sugaya², Shuhei Yagi¹, Hiroyuki Yaguchi¹ (1.Saitama Univ., 2.AIST)

“光イオントロニクス”観点から見た CIGS 光電極の水分解キャリアダイナミクスの検討

Investigation of “optoiontronic carrier dynamics” during water splitting using CIGS photoelectrode

東京理科大学 創域理工¹/総研²,

◦植田 かな¹, 杉山 睦^{1,2}

1. Faculty of Science and Technology / 2. RIST, Tokyo Univ. of Science

◦K. Ueda¹, M. Sugiyama^{1,2} E-mail: optoelec@rs.tus.ac.jp

【はじめに】 グリーン水素生成のための光電極材料には、太陽光スペクトルの大部分を水分解反応に寄与する電子へと変換可能な半導体が求められる。Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)はナローバンドギャップを有し、可視光領域の光吸収係数も高いことから、太陽電池だけでなく高効率光電極材料として期待されている[1]。一方で CIGS 系半導体を反応面とした光電極では、表面欠陥等によって光電流が減少する報告があり[2]、固液界面における水分解メカニズムの詳細な検討が求められる。一般に光電極は、材料の光吸収によるキャリア励起・ドリフトなどの“物理的要素(光エレクトロニクス)”と、イオン伝導や電解などの“化学的要素(イオニクス)”が同時に生じることによって水素が生成するが、これまでは各分野の専門家による片面からの研究が主流であった。高効率水素生成デバイス実現のためには、物理・化学“両面”からキャリアダイナミクスを検討するための、光イオントロニクス(=光エレクトロニクス+イオニクス)の概念を提唱し、新たな材料評価手法の確立が重要となる。図 1 に水分解反応時の光電極/水溶液界面付近のキャリアダイナミクスを示す。水分解反応時には光電極側の光エレクトロニクス(図 1-1)と、水溶液側のイオニクス(図 1-2)に加え、光電極/水溶液界面付近のイオン・電子双方が水分解反応に寄与する“光イオントロニクス”(図 1-3)キャリアダイナミクスが存在する。本研究では CIGS 光電極 in-situ 測定の提案により水分解反応時光電極/水溶液界面付近のキャリアダイナミクスを観測することで、光イオントロニクス観点からの水分解反応メカニズムの解明に向けた検討を行った。

【実験方法及び結果・考察】

Mo/SLG 上に MBE 装置を用いて成膜した CIGS 薄膜を光電極化した。本稿では、CIGS 光電極の光イオントロニクス観点による水分解キャリアダイナミクス解明の手段として、水分解反応時 in-situ 時間分解フォトルミネッセンス法を試みた。当日は大気中での CIGS 光電極の諸物性と比較しながら、水素生成反応メカニズムについて報告する。

【謝辞】 本研究の一部は、JST 次世

代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151、東京理科大学総合研究院再生可能エネルギー技術研究部門、およびスペースシステム創造研究センターの支援を受けた。

【参考文献】 [1] Our group, J. Phys. D: Appl. Phys. **57** (2024) 135103.

[2] S. Ikeda, et al., ChemSusChem **4** (2011) 262.

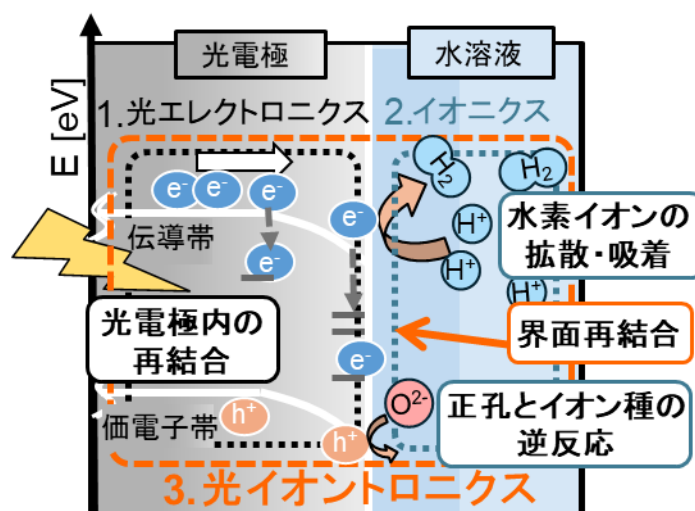


図 1. 光電極・水溶液界面付近における
光イオントロニクス観点によるキャリアダイナミクス

ミスト CVD 法を用いた(In,Ga)₂S₃ 薄膜の作製

Deposition of (In,Ga)₂S₃ Thin Films via Mist-CVD Method

東工大工 〇(M2)荒木 耀平¹, (D2)船木 顕広¹, 西村 昂人¹, 山田 明¹

¹Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Tech

〇¹Yohei Araki, ¹Akihiro Funaki, ¹Takahito Nishimura, ¹Akira Yamada

E-mail: araki.y.ak@m.titech.ac.jp

1. 研究背景

Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 太陽電池において, n 型バッファ層は高効率化のために重要である. しかし, 従来バッファ層として用いられてきた CdS は, バンドギャップが狭いことに起因する短波長光の損失や, 環境負荷が高い Cd の使用といった課題がある. これまでに我々の研究室では, CdS の代替材料として In₂S₃ に着目し, 大気開放型 CVD 法による In₂S₃ 薄膜の製膜を行ってきた[1]. しかし, バンドギャップが可変である CIGS の特性を十分に活かすためには, 電氣的・光学的特性を制御可能なバッファ層が必要となる. 今回, 我々はミスト CVD 法を用いて, これらの制御が期待される(In,Ga)₂S₃ 薄膜の作製について検討したので報告する.

2. 実験方法

(In,Ga)₂S₃ 薄膜は, ミスト CVD 法を用いて無アルカリガラス基板上に作製した. 成膜時の意図しない酸素の混入を防ぐため, 製膜は窒素雰囲気下で行った. 原料溶液は, ジエチルジチオカルバミン酸インジウム (In-DTC) およびジエチルジチオカルバミン酸ガリウム (Ga-DTC) を脱水 THF に溶解させ, 0.02 mol/L に調整したものを用いた. 溶液中の Ga および In の比率(GGI; Ga/(Ga+In))は, 0 から 1 まで変化させた. 原料溶液は超音波により霧化され, キャリアガス (N₂, 1.0 L/min) により 450°C に加熱したガラス基板まで輸送することで薄膜の堆積を行った.

3. 実験結果

Fig.1 に, 得られた薄膜の XRD 測定結果を示す. 溶液中の GGI が 0 に近く In 比率が高い薄膜からは, 28.7°, 43.7°, 59.4° にそれぞれ β-In₂S₃ の(206)面, (309)面, (4012)面に対

応する回折ピークが得られ, 溶液中の GGI が増加すると, β-In₂S₃ の配向が見られなくなった. また, 光学的特性としてバンドギャップを算出すると, GGI=0.5 では, 直接および間接遷移ギャップがそれぞれ 2.3 eV と 3.2 eV となり, Ga を添加することによって In₂S₃ の 2.0 eV および 2.7 eV よりもワイドギャップ化していることが確かめられた. これらの結果より, ミスト CVD 法によりガラス基板上に堆積した薄膜において, 溶液中の GGI を調整することでバンドギャップの調整が可能であることが示唆された.

当日は, 得られた(In,Ga)₂S₃ 膜のより詳細な電氣的・光学的特性を含めて報告する予定である.

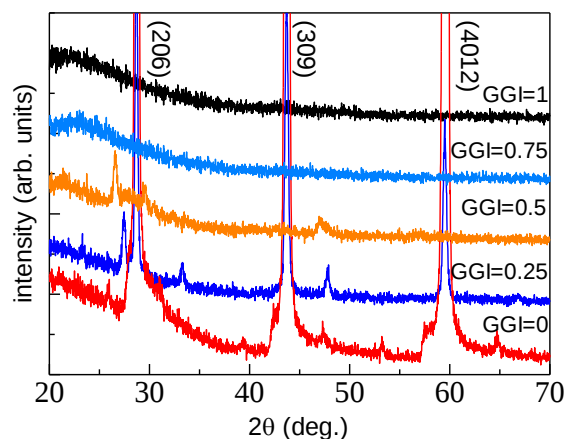


Fig.1 X-ray diffraction spectra of (In,Ga)₂S₃ thin film deposited via mist-CVD.

謝辞

本研究は, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援を受けて実施された. 関係各位に感謝する.

参考文献

[1] A. Funaki et. al., Phys. Status Solidi RRL, 2300383 (2023).

Cu(In,Ga)Se₂ 太陽電池における n 層一体型 Zn-Ge-O の開発

Development of integrated Zn-Ge-O n-layer for CIGSe solar cells

東工大工学院¹ (M2) 山田 裕太郎¹, 鈴木 陽太¹, 西村 昂人¹, 山田 明¹

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Tech.¹

[○]Yutaro Yamada¹, Yota Suzuki¹, Takahito Nishimura¹, Akira Yamada¹

E-mail: yamada.y.ca@m.titech.ac.jp

1.はじめに

近年、Cu(In,Ga)Se₂(CIGSe)太陽電池のワイドバンドギャップ化ならびにタンデム化により、低電子親和力を有する新規 n 型バッファ層が求められている。

先行研究において、低電子親和力なバッファ層として、ZnO と GeO₂ の酸化物混晶である Zn-Ge-O に着目し、[Zn]/([Zn] + [Ge])比を 0~8.1%まで変化させることにより電子親和力が 4.06~4.42 eV の範囲で制御できることを明らかにしてきた。[1]しかし、低電子親和力なバッファ層として Zn-Ge-O を用いた場合、Zn-Ge-O/ZnO:B 界面の伝導帯オフセットが大きくなり、順方向バイアス時に Zn-Ge-O/ZnO:B 界面の電子障壁によって電子の流れが阻害されると考えられる。本研究では、Zn-Ge-O/ZnO:B 間の伝導帯オフセットがCIGSe太陽電池の性能に及ぼす影響を調べたのでその結果を報告する。

2.デバイス解析

ZnO:B/Zn-Ge-O/CIGSe積層構造を有するCIGSe太陽電池においてSCAPSを用いたデバイス解析を実施した。デバイス解析において、ZnO:B/Zn-Ge-O界面の伝導帯オフセットに着目し、type1(CIGS/Zn-Ge-O(Ge12.8%,50nm)/ZnO:B),type2(CIGS/Zn-Ge-O(Ge12.8%,25nm)/Zn-Ge-O(Ge6.1%,25nm)/ZnO:B),type3(CIGS/Zn-Ge-O(Ge12.8%→Ge0%,50nm)/ZnO:B)の3型で比較した。type1 ではZn-Ge-Oを通常のバッファ層とし、type2 ではGe濃度の異なる2層をバッファ層、type3 ではGe濃度を連続的に変化させたバッファ層を仮定した。表面付近のCIGSe光吸収層のGa濃度は24%であり、このときGe濃度12.8%のZn-Ge-Oに対

して0.23eVのスパイクが存在している。[1]

3.結果および考察

Fig1 に SCAPS を用いて出力したそれぞれのCIGSe太陽電池のIVカーブを示す。デバイス解析結果からZn-Ge-O/ZnO:B界面の電子障壁により、type1の性能が低下することが明らかになった。これに対してtype2あるいはtype3の伝導帯構造を採用することにより、電子障壁の効果が低減された。当日は太陽電池特性に対するZn-Ge-O/ZnO:B界面の伝導帯オフセットの影響について実験結果とともに議論する。

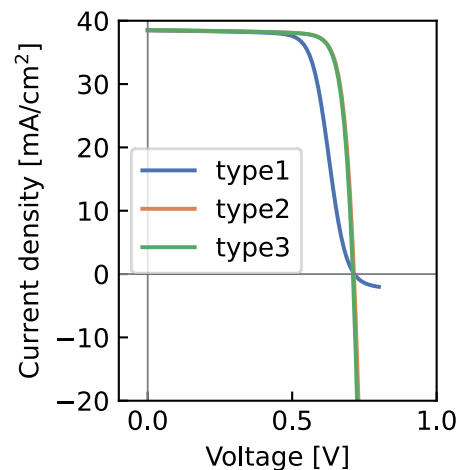


Fig1. IV curves of a CIGSe solar cell obtained from simulation results

謝辞

本研究はNEDOの助成により行われた。関係各位に感謝する。

参考文献

[1] D. Egyna et al., Cryst. Res. Technol. 58, 2, 2200145 (2023).

ベイズ最適化を用いた Cu(In,Ga)Se₂ 光吸収層の構造設計

Structural design of CIGSe optical absorption layer by Bayesian Optimization

東工大工学院¹ (M2) 河西 竜輝¹, 船木 顕広¹, 西村 昂人¹, 山田 明¹

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Tech.¹

[○] Ryuki Kasai¹, Akihiro Funaki¹, Ryotaro Fukuda¹, Takahito Nishimura¹, Akira Yamada¹

E-mail: kasai.r.aa@m.titech.ac.jp

1.はじめに

Cu(In,Ga)Se₂(CIGSe)太陽電池は高効率な薄膜太陽電池の一つとして注目されている。しかしながら変換効率に寄与するパラメータの多さ、および各パラメータが相互に依存していることから最適構造の解析が難しくなっている。本稿では「ベイズ最適化」を用いて高い変換効率を示すパラメータの組み合わせを探索し、その結果を分析したので報告する。

2.実験方法

ZnO:B/CdS/表面層/CIGS 積層構造を有する CIGSe 太陽電池において SCAPS を用いたデバイス解析を実施した。太陽電池の最適化にあたり、CIGSe の裏面と表面から深さ $0.4 \mu\text{m}$ (以降、中央) の箇所での Ga/(Ga+In) 比(GGI)の差 $\text{GGI}_{\text{back-mid}}$, 中央と表面での GGI の差 $\text{GGI}_{\text{mid-front}}$, 裏面から中央にかけての厚さ $t_{\text{CIGS_back}}$, 中央から表面にかけての厚さ $t_{\text{CIGS_front}}$, $t_{\text{CIGS_back}}$ と $t_{\text{CIGS_front}}$ の合計値 $t_{\text{CIGS_total}}$, および CIGSe 層の電子拡散長 L_n , の6パラメータに着目した。探索にあたり、Mo 電極との接合面における欠陥を想定し、その再結合速度を $1.0 \times 10^7 \text{cm/s}$, $1.0 \times 10^3 \text{cm/s}$, 0cm/s (なし) と変化させることにより、高効率に寄与するパラメータ条件を調べた。

3.結果および考察

Fig1 に $L_n=1.9 \mu\text{m}$, 裏面再結合速度 $1.0 \times 10^7 \text{cm/s}$, $t_{\text{CIGS_total}}=3.0 \mu\text{m}$ に固定した際の変換効率のカラーマップを示す。色が濃い箇所は変換効率が高く、薄い箇所は変換効率が低い。カラーマップの横軸は $t_{\text{CIGS_front}}$ の値を、縦軸は $\text{GGI}_{\text{mid-front}}$ の値を表す。① $t_{\text{CIGS_front}}$ が小さいとき、すなわち表面側の膜厚が小さい時は $\text{GGI}_{\text{mid-front}}$ の値は0付近すなわち中央から表面にかけての Ga 組成は一定にすることで効率 24.8%、②表面側の膜厚が大きい時は中央から表面にかけて Ga 組成を少なくすることで効率 25.0%を達成できることがわかった。

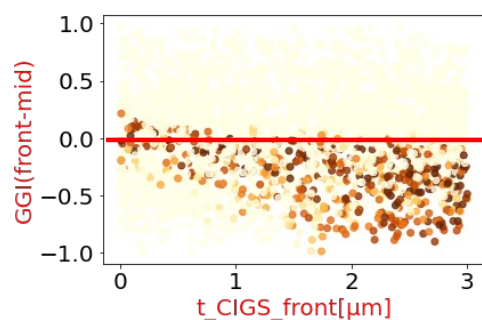


Fig1. Relationship between 2 parameters and conversion efficiency

当日は先述の6パラメータに対する変換効率の影響を詳細に議論する。

謝辞

本研究はNEDOの助成により行われた。関係各位に感謝する。

CIS 系太陽電池における Mo 裏面電極の表面電子構造

Surface electronic structure of Mo-back electrode in CIS-based solar cells

鹿児島大¹, 産総研² ○大場 幹也¹, 上川 由紀子², 永井 武彦², 石塚 尚吾²,
西永 慈郎², 反保 衆志², 青野 祐美¹, 奥田 哲治¹, 寺田 教男^{1,2}
Kagoshima Univ.¹, AIST.², ○M. Oba¹, Y. Kamikawa², T. Nagai², S. Ishizuka²,
J. Nishinaga², H. Tampo², M. Aono¹, T. Okuda¹, N. Terada^{1,2}

E-mail: k7176881@kadai.jp

はじめに Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)太陽電池において、常用される Mo 裏面電極表面には電池プロセス中に Mo-Se 化合物層が形成される。当グループは超高真空中リフトオフにより露出させた CIGS 電池の Mo 電極表面の Mo-Se 層が MoSe₂ 単結晶と異なる電子構造(p 型的)を持つことで、CIGS 層裏側のバンドを上昇させることによる Back surface field (BSF)の増強と価電子帯上端 (VBM)の逆傾斜を緩和する、電池特性に有益なバンド接続の発現が推定されることを報告した。これまでに、この特異な電子構造が MoSe₂ 相中の Mo 欠損由来であることを示唆するデータが得られているものの、さらなる検討が必要と考えられた。今回、特異な電子構造の構造起源の明確化を目的として、Mo スパッタ膜を Se 化した表面の状態と Se 化温度の関係を調べ、電池中の当該表面との相関を検討した。

実験 ソーダライムガラス(SLG)基板上に Mo をスパッタ堆積し、Se を 100 nm、MBE 法によって室温蒸着した Se/Mo/SLG 構造を出発試料とした。続いて、高真空中で 30 分 *in-situ* アニールを行うことで Mo 表面を Se 化した。一部の試料では Mo 膜表面を自然酸化した後に Se 化を行った。Se 化表面の組成、仕事関数 ϕ はそれぞれ *in-situ* XPS、UPS スペクトルの cutoff により評価した。

結果 表 1 に金属的 Mo 膜表面を Se 化した試料の Mo : Se 比、 ϕ と Se 化温度の関係を示す。Se 化表面はいずれも単結晶の真空中劈開面と比べて Mo 欠損組成、顕著に高い ϕ を持つこと、また Se 化温度の上昇に伴い、欠損と ϕ が増大する傾向があることがわかる。表 2 に CIGS 電池中の Mo 電極表面の組成、 ϕ と電池プロセス最高温度の関係を示す。Mo 欠損、 ϕ の変動幅が表 1 よりも大きいものの、プロセス温度の上昇により Mo 膜 Se 化表面と同方向に変化していることがわかる。この結果は、Mo 電極表面の高い ϕ の構造起源が Mo ダイカルコゲナイド相における Mo 欠損であることを支持している。MoO₃ 相が支配的な自然酸化膜に Se を堆積し、400℃で処理を行ったところ、Se は処理後に観測されず、MoO_{3-x}が残存することが見出され、酸化領域上に Mo-Se 化合物は形成され難いことがわかった。MoO₃ は n 型、ワイドギャップかつ高い ϕ を持つことからホール伝導に寄与しないことが考えられる。この結果は Mo 電極の酸素濃度とその面内分布が CIS/Mo 界面の伝導パス領域を限定し、ポイントコンタクト制御に影響することを示唆している。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の支援により実施された。関係各位に感謝する。

Table 1. Changes in Mo:Se compositional ratio and work function of selenized surface of metallic Mo sputtered film in conjunction with selenization temperature.

Selenization temperature [°C]	Mo:Se	Work function ϕ [eV]
350	0.87 : 2.00	5.16
450	0.80 : 2.00	5.20
500	0.81 : 2.00	5.25
MoSe ₂ single crystal	1.00 : 2.00	4.38~4.42

Table 2. Changes in Mo:Se compositional ratio and work function of surface of Mo-back electrode in CIGSSe-based cell exposed by UHV lift off in conjunction with the highest temperature in fabrication process.

Cell process temperature [°C]	Mo:anion	Work function ϕ [eV]
400	0.86~0.87 : 2.00	4.77
550	0.84 : 2.00	4.94
600	0.69~0.70 : 2.00	5.15

MAPbI₃/Si ヘテロ構造を利用した 二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池

Two-step photon up-conversion solar cells using a MAPbI₃/Si heterostructure

神戸大院工 ○(M2) 徳永隼也, 鬼塚遼平, 朝日重雄, 喜多隆

Grad. Sch. of Eng. Kobe Univ., ○Shunya Tokunaga, Ryohei Onitsuka, Shigeo Asahi and Takashi Kita

E-mail: 235t241t@stu.kobe-u.ac.jp

【はじめに】我々は単接合型太陽電池の理論変換効率を上回る太陽電池として、透過損失の低減を目指した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池 (TPU-SC) を提案し、実現に向けた検討を進めている[1]。TPU-SC はワイドギャップ半導体 (WGS) とナローギャップ半導体 (NGS) を接合した構造をしており、ナローギャップ半導体で生成されたキャリアが、ワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体のヘテロ界面に高密度に蓄積される。さらに、太陽光に含まれる低エネルギーフォトンによりワイドギャップ半導体へ励起されることで、効率的なアップコンバージョン (TPU) が起こる。これまでに AlGaAs と GaAs のヘテロ接合を利用した TPU-SC を作製し、効率的な TPU を実証してきたが、我々は TPU 現象は材料系に依らないと考えている。そこで、本研究では WGS にペロブスカイト系結晶の MAPbI₃、NGS に n^+ -Si を用いて TPU 現象を実証することを目的として実験を行った。その結果、この新たな太陽電池構造で TPU 現象を観測したので報告する。

【結果】測定に用いた TPU-SC はスピンコート法により、 n^+ -Si 基板上に MAPbI₃ と spiro-OMeTAD を成膜し、真空蒸着法により表面電極の Au 及び、裏面電極の Ag を成膜することによって作製した。 n^+ -Si 基板は $0.1\ \Omega\text{m}$ と $20\ \mu\Omega\text{m}$ の抵抗率を持つ 2 種類の基板を使用した。 n^+ -Si 基板の抵抗率は、電子密度による差と考えている。作製した TPU-SC の構造を図 1 に示す。本構造では n^+ -Si で生成された正孔が追加赤外光により MAPbI₃ 層へアップコンバージョンする。実験では TPU の 1 段階目に相当する $900\ \text{nm}$ のバンド間励起光の強度を $6000\ \text{mW}/\text{cm}^2$ に固定し、2 段階目に相当する $1319\ \text{nm}$ のバンド内励起光 (追加赤外光) の照射時と非照射時の短絡電流密度の差 ΔJ_{sc} のバンド内励起光強度依存性を室温で測定した。その結果を図 2 に示す。 $0.1\ \Omega\text{m}$ の抵抗率の n^+ -Si 基板を利用した TPU-SC では、追加赤外光の強度増加に伴い、明瞭な電流上昇を観測した。これは、 $900\ \text{nm}$ の励起光で n^+ -Si 基板に生成された正孔が、追加赤外光によりアップコンバージョンされ、電流が増加したと考える。一方、 $20\ \mu\Omega\text{m}$ の抵抗率をもつ n^+ -Si 基板では $0.1\ \Omega\text{m}$ と比べ ΔJ_{sc} が小さかった。これは、 $20\ \mu\Omega\text{m}$ の基板では高い電子密度に起因する短い正孔の拡散長のため、ヘテロ界面に正孔が十分に蓄積せず、 ΔJ_{sc} が小さくなったと考える。以上のように MAPbI₃ を用いた本構造において、追加赤外光の照射による TPU を実証した。

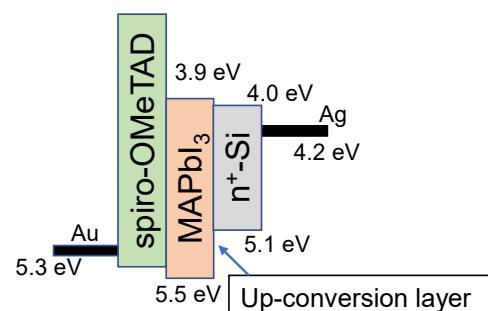


Fig.1 Structure of perovskite TPU-SC.

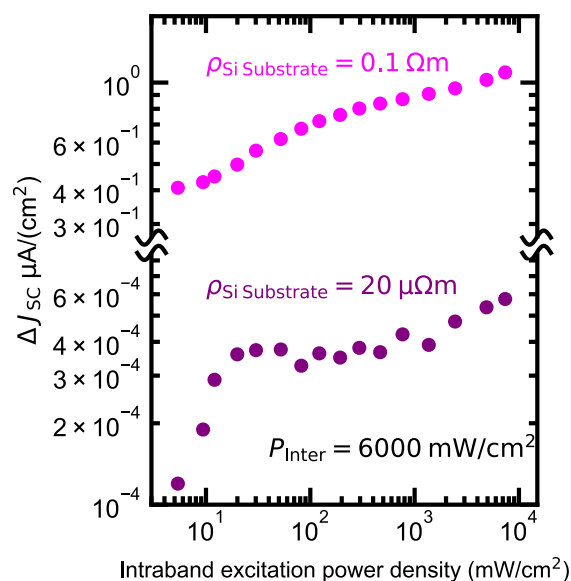


Fig.2 Intraband excitation power dependence of ΔJ_{sc} .

[1] S. Asahi *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 14962 (2017)

Intraband Transitions Induced by Below-Bandgap Photoexcitation at CsPbBr₃/GaAs Heterointerface

Kobe Univ.¹, °Hambalee Mahamu¹, Shigeo Asahi¹, Takashi Kita¹

E-mail: 203t268t@cloud.kobe-u.jp

Two-step photon upconversion (TPU) is a physical phenomenon associated with the sequential excitation of an electron. Firstly, the electron is excited by a process called interband excitation (band-to-band excitation). The excited electron, then, absorbs a sub-bandgap photon and is excited to a higher energy state. The latter process is called intraband excitation. Two-step photon upconversion solar cells (TPU-SCs) were realized using III-V semiconductors, namely Al_{0.3}Ga_{0.7}As and GaAs [1]. Since the semiconductors exhibit different energy bandgaps, the band discontinuity at the heterointerface (HI) allows carrier accumulation. In this case, electrons can be generated by the interband excitation in GaAs. The accumulated electrons at the HI can absorb sub-bandgap photons which allows the intraband excitation. The accumulating electron density can be enhanced by the incorporation of quantum structures which relax the optical selection rule. In this work, we investigate perovskite/III-V semiconductor HI and its influence on intraband excitation which can be improved further for TPU-SC applications.

We fabricate a simple inverted solar cell structure of Ag/ZnO/CsPbBr₃/p-GaAs/Au-Zn/Au. The CsPbBr₃ perovskite layer was grown by multi-step spin coating. Considering the achieved structure, CsPbBr₃/GaAs HI exhibits band discontinuity with energy difference at the conduction band and the valence band (denoted by ΔE_{CB} and ΔE_{VB} respectively) of $\Delta E_{CB}=0.77$ eV and $\Delta E_{VB}=0.11$ eV. The $\Delta E_{CB}:\Delta E_{VB}$ ratio of 7:1 shows a higher theoretical energy conversion efficiency than Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs HI for which the $\Delta E_{CB}:\Delta E_{VB}$ is approximately equal to 3:2 [2]. Therefore, CsPbBr₃/GaAs-based TPU-SCs can achieve higher efficiency than III-V semiconductor-based TPU-SCs.

We characterized the CsPbBr₃/GaAs-based TPU-SCs by various measurements. The External quantum efficiency spectrum measured under single-color conditions, i.e., only the interband excitation occurs, shows clear absorption band edges of CsPbBr₃ and GaAs. The measurement of gains in photocurrent and photovoltage (denoted by ΔJ_{SC} and ΔV_{OC} respectively) exhibit notable features. We measured the photocurrent and photovoltage under the 784-nm photoexcitation with and without additional 1319-nm sub-bandgap photoexcitation (two-color and single-color conditions respectively). The ΔJ_{SC} and ΔV_{OC} can be defined by the following:

$$\Delta J_{SC} = J_{SC, \text{two-color}} - J_{SC, \text{single-color}}$$

$$\Delta V_{OC} = V_{OC, \text{two-color}} - V_{OC, \text{single-color}}$$

The results show that ΔJ_{SC} increases with increasing 1319-nm excitation intensity. However, the increase in ΔJ_{SC} can be due to thermal activation at the HI. Here, ΔV_{OC} is an important indicator to distinguish the intraband excitation from the thermal activation. Since thermal carrier population induces a reduction in V_{OC} , ΔV_{OC} should be negative with increasing temperature. In contrast, the intraband excitation relates to the increase in electron density at the CB of the WGS (in this case, CsPbBr₃). Therefore, the observed positive values and increasing features of ΔV_{OC} with 1319-nm sub-bandgap photon intensity are strong evidence for the intraband excitation at the HI.

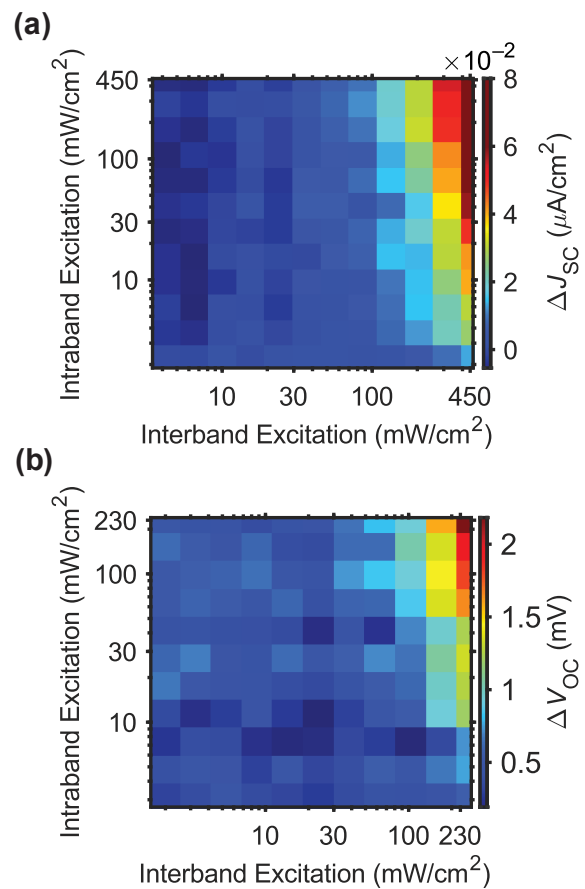


Fig. 1 (a) ΔJ_{SC} and (b) ΔV_{OC} maps visualized as functions of interband and intraband excitations

References

- [1] S. Asahi, H. Teranishi, K. Kusaki, T. Kaizu, T. Kita, Nat. Commun. **8**, 14962 (2017).
- [2] S. Asahi, K. Kusaki, Y. Harada, T. Kita, Sci. Rep. **8**, 872 (2018).

2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内赤外光学遷移の量子ドットによる増強特性

Gain characteristics of intraband infrared optical transition induced by Quantum Dots in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells

神戸大工 ○(M1)山本祥, 永井大地, 朝日重雄, 喜多隆

Grad. Sch. of Eng. Kobe Univ., °Sho Yamamoto, Daichi Nagai, Shigeo Asahi, and Takashi Kita

E-mail: 236t263t@stu.kobe-u.ac.jp

【はじめに】我々は単接合型太陽電池の理論変換効率を上回る太陽電池として、透過損失の低減を目指した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池 (TPU-SC)を提案し、実現に向けた検討を進めている[1]。TPU-SCはワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体を接合した構造をしており、ナローギャップ半導体で生成されたキャリアが、ワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体のヘテロ界面に高密度に蓄積される。さらに、太陽光に含まれる低エネルギーフォトンによりヘテロ界面に蓄積された電子がバンド内遷移によりワイドギャップ半導体へ励起されることで、効率的なアップコンバージョンが生じる。また、ヘテロ界面におけるアップコンバージョン (TPU) 効率を向上するため、量子ドット (QDs) を挿入している。本研究ではヘテロ界面からの QD 層の距離を精密に変えたデバイスを複数作製し、TPU への QDs の影響を明らかにしたので報告する。

【結果】本研究に用いた TPU-SC は固体ソース分子線エビタキシー法によって p -GaAs(001)基板上に作製した。太陽電池構造を図1に示す。この太陽電池では、ワイドギャップ半導体に $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 、ナローギャップ半導体に GaAs を使用した。また、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ のヘテロ界面に挿入する InAs QD は、ヘテロ界面から 6 nm、10 nm と位置を変えた2種類のデバイスを作製した。実験では TPU の1段階目に相当する 800 nm のバンド間励起光および、ヘテロ界面の電子を励起する 1319 nm の赤外光をデバイスに照射した際の開放電圧を測定した。赤外光を追加照射した際の開放電圧増加量を ΔV_{oc} として、 ΔV_{oc} のバンド間励起光強度依存性を図2に示す。ここでは追加赤外光は 500 mW/cm^2 一定とした。図に示すように 6 nm のデバイスは 10 nm のものより大きな ΔV_{oc} を観測した。この結果より、QD はヘテロ界面近傍に挿入した方が、その効果が高いことが分かる。これは、ヘテロ界面に蓄積した電子の赤外光の吸収率の差と、追加赤外光によりアップコンバージョンされた電子の取り出し効率の差によるものの2種類のメカニズムの可能性を考えている。講演ではそのメカニズムについても議論する。

[1] S. Asahi *et al.*, *Nat. Commun.* **8**, 14962 (2017).

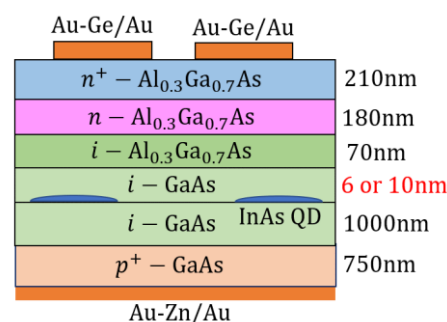


Figure 1: Structure of the TPU-SCs

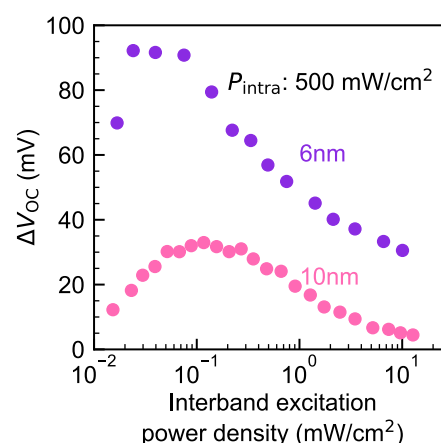


Figure 2: Interband excitation power density dependence of ΔV_{oc} .

中間バンドを有する熱放射ダイオードの理論発電密度 (II)

Theoretical power density of thermoradiative diode with an intermediate band (II)

神戸大院工 ○ 原田 幸弘, 喜多 隆

Kobe Univ., ○ Y. Harada and T. Kita

E-mail: y.harada@eedept.kobe-u.ac.jp

【はじめに】熱放射発電は、発電素子からの赤外線放射を利用した発電方法として注目されているが、ナローバンドギャップ半導体で構成される熱放射ダイオード (TRD) では高温で pn 接合を形成することが困難である。我々は中間バンドを有する TRD (IB-TRD) に着目し、伝導帯-IB 間と IB-価電子帯間の遷移を利用した理論発電密度を明らかにしてきた [1]。本研究では、IB を介した遷移の吸収率 (放射率) が発電密度の理論限界に与える影響を明らかにすることを目的とした。

【計算方法】輻射限界における IB-TRD の発電密度は、詳細平衡モデルを用いて計算した。中間バンド型太陽電池 [2] の場合と同様に、IB を介した遷移で電流整合条件を満たし、伝導帯-価電子帯間の電子-正孔対の化学ポテンシャルは IB を介した遷移における化学ポテンシャルの和に一致すると仮定した。また、各遷移の吸収率 a_i ($i=ci, iv, \text{ or } cv$) はバンドギャップエネルギー以上で一定とし、以下の式を用いて各遷移間での光吸収スペクトルの重なりを考慮した。

$$\alpha_i^*(E) = \left\{ 1 - \prod_j [1 - \alpha_j(E)] \right\} \frac{\alpha_i(E)}{\sum_j \alpha_j(E)}.$$

【結果と考察】図 1 に、 $E_{cv} = 0.4 \text{ eV}$ の IB-TRD における発電密度の伝導帯-IB 間と IB-価電子帯間の吸収率 (a_{ci} と a_{iv}) 依存性を示す。ここで、素子温度 $T_c = 500 \text{ K}$ 、環境温度 $T_e = 300 \text{ K}$ 、 $a_{cv} = 1$ とした。図 1(a), 1(b), 1(c) はそれぞれ、 $E_{ci} = 0.20, 0.15, 0.12 \text{ eV}$ における結果である。 E_{cv} の中央に IB が位置する図 1(a) では、発電密度は a_{ci} と a_{iv} に対して対称に変化する。一方、IB-TRD では、IB を介した遷移における電流整合条件に起因して、IB が E_{cv} の中央に位置しない場合に発電密度は最大となる [1]。IB 位置が E_{cv} の中央から離れると発電密度は a_{ci} と a_{iv} に対して非対称に変化し、図 1(c) に示すように $a_{ci} \neq 1$ において最大値を取る。この結果は、バンドギャップエネルギーに応じて IB-TRD の吸収率の最適化が必要であることを示唆している。

【参考文献】 [1] 原田 他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-12L-8 (2024). [2] A. Luque and A. Martí, Phys. Rev. Lett. **78**, 5014 (1997).

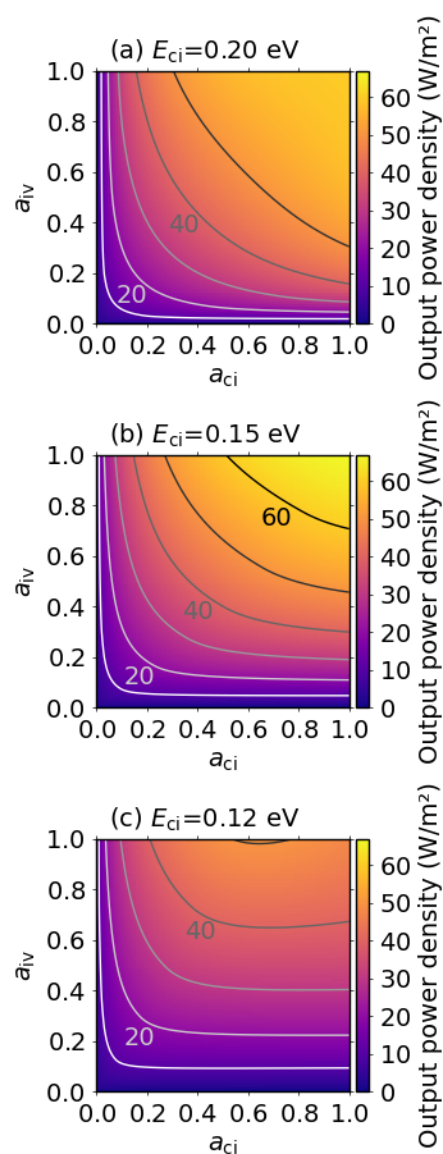


Fig. 1. Output power density of the IB-TRD as functions of a_{ci} and a_{iv} for $E_{cv} = 0.4 \text{ eV}$ at $T_e = 300 \text{ K}$ and $T_c = 500 \text{ K}$. (a), (b), and (c) are the results for $E_{ci} = 0.20, 0.15$, and 0.12 eV , respectively.

分子材料の三重項消滅、一重項分裂を利用した 太陽電池互換 2 波長レーザー対応光電変換素子

Dual-Wavelength Laser Power Converters Compatible with Solar Cells

Using Triplet-Triplet Annihilation and Singlet Fission of Molecular Systems

豊田中研 [○]竹田 康彦

Toyota Central R&D Labs., Inc. [○]Yasuhiko Takeda

E-mail: takeda@mosk.tytlabs.co.jp

高効率の太陽電池の実現が難しい理由の 1 つが、幅広い太陽光スペクトルである。これまでに、単一材料を用いながら(即ち、多接合以外の方法で)この問題を克服するための様々なコンセプトが提案、原理実証された。本研究では、これらのコンセプトのうち、分子材料の三重項消滅(TTA)及び一重項分裂(SF)をレーザー用光電変換素子(laser power converter, LPC)に適用した、2波長のレーザーを高効率で光電変換し、かつ太陽電池としても機能する、2波長対応(dual-wavelength, DW)LPCを提案する[1,2]。

単一波長のレーザー光の下で動作するLPCとは異なり、走行中の電気自動車(EV)や飛行中のドローンなどの移動体への光無線エネルギー伝送(optical wireless power transmission, OWPT)に用いられるLPCには、複数波長のレーザー光、例えば閉鎖空間中では低コストかつ大出力の808 nm LD光の、市街地では1470 nm アイセーフ LD光の照射があり得るので、太陽電池と同様の問題が生じる。更に、OWPT 圏外でも移動体に搭載された蓄電池を充電できるよう、太陽電池としての機能も求められる。

TTA-DW-LPC のエネルギー準位と光励起過程を図 1(a)に示す。1470 nm 光照射時には 2 光子が 1 つのキャリアに変換される。エネルギー散逸過程である intersystem crossing ($S_1 \rightarrow T_1$) が、逆過程を防ぐ quantum ratchet (QR) として機能する。一方、SF-DW-LPC の場合は、図 1(b)に示されるように、1 つの 808 nm 光子が 2 つのキャリアを生成する。SF は吸熱反応となり得るので、 S_1 エネルギー(808 nm 相当、1.53 eV) が T_1 エネルギー(1470 nm 相当、0.84 eV) の 2 倍(1.68 eV)に僅かに及ばなくても SF が生じ得る。

TTA-, SF-DW-LPC に波長 808 nm 光(η_{808})、1470 nm 光(η_{1470})、及び AM 1.5 G 太陽光(η_{solar})を照射したときの radiative limit 変換効率を、他の素子の値と図 2 にて比較する。3 種類の照射光の何れの場合も、これら 2 つの LPC の変換効率は Single purpose 素子(従来型単接合 LPC 及び 2 接合太陽電池)の値に匹敵する。TTA-DW-LPC の値は、QR の効果により、同じく 2 つの 1470 nm 光子を 1 つのキャリアに変換する中間バンド(IB)太陽電池を基にした IB-DW-LPC の値を上回る。SF-DW-LPC は吸熱反応であるため、やはり 1 つの 808 nm 光子の吸収により 2 つのキャリアが生成する多重励起子生成(MEG)を利用する MEG-DW-LPC よりも高い変換効率となる。ただしこれらを実現するためには、波長 1470 nm に対応する低エネルギー準位をもつ、新分子材料の開発が必要である。

[1] Y. Takeda, IEEE J. Photovolt. **14**, 442 (2024).

[2] Y. Takeda, submitted.

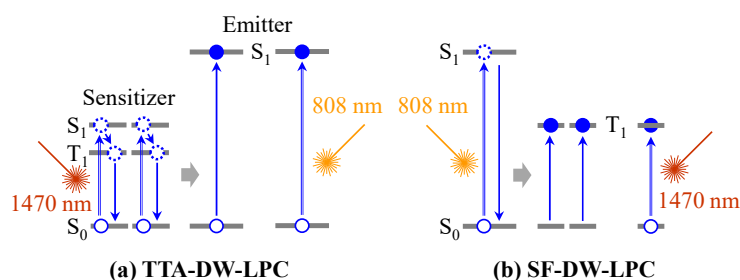


Fig. 1 Energy diagrams and photo-excitation mechanisms of the dual-wavelength laser power converters (DW-LPCs).

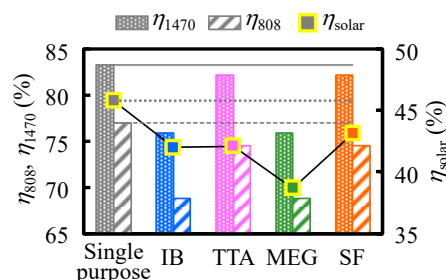


Fig. 2 Comparison of η_{808} , η_{1470} , and η_{solar} among the DW-LPCs of different mechanisms. The laser intensities are 10 W/cm².

光無線給電用 InGaN 太陽電池の光学損失の検討

Investigation of the optical loss of InGaN solar cells for optical wireless power transmission

千葉工業大学¹, 名古屋工業大学², 名城大学³, ウシオ電機⁴

鈴木 淳一¹, 高橋 龍成¹, 金子 優翔¹, 青山 怜央¹, 古賀 誠啓¹, 渋谷 駿昌¹, 野口 尊央¹,
林 駿希¹, 藤澤 孝博², 伊井 詩織³, 渡邊 琉加³, 深町 俊彦⁴, 難波江 宏一⁴,
三好 実人², 竹内 哲也³, 上山 智³, 内田 史朗¹

Chiba Inst¹, Nagoya Inst², Meijo University³, Ushio Inc.⁴

Junichi Suzuki¹, Ryusei Takahashi¹, Yuto Kaneko¹, Reo Aoyama¹, Masahiro Koga¹, Shunsuke Shibui¹,
Takahiro Noguchi¹, Shunki Hayashi¹, Takahiro Fujisawa², Shiori Ii³, Ruka Watanabe³, Toshihiko Fukamachi⁴,
Koichi Naniwae⁴, Makoto Miyoshi³, Tetsuya Takeuchi³, Satoshi Kamiyama³, Shiro Uchida¹

E-mail:s20a3068nv@s.chibakoudai.jp

1. Introduction

光無線給電は次世代のワイヤレス給電方式として注目されており、海中での応用も期待されている。海中では近紫外光の損失が少ないことから 400nm 以下の光を吸収できる InGaN 太陽電池に注目した。本研究では InGaN 太陽電池の高効率化に向けての課題である光学損失について調査した。

2. Experiment and Results

Fig.1, 2 に InGaN 太陽電池の素子構造と透過損失実験の概要図を示す。Fig.3, 4 に InGaN 太陽電池の反射率と透過率の測定結果をそれぞれ示す。今回の実験では反射防止膜(SiO₂ 72.7nm)を成膜した InGaN 太陽電池に波長 393 nm, 395 nm, 397 nm, のレーザを照射しその透過率を測定した。透過率は反射とシャドーロスを除き、InGaN 吸収層の透過率を計算により求めた。

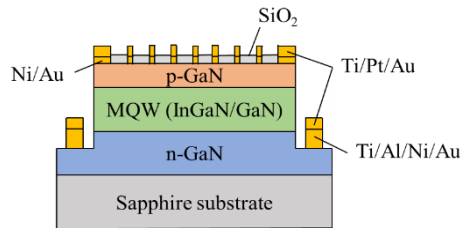


Fig.1. InGaN solar cell structure

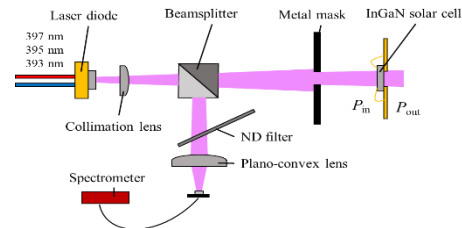


Fig.2. Experimental configuration

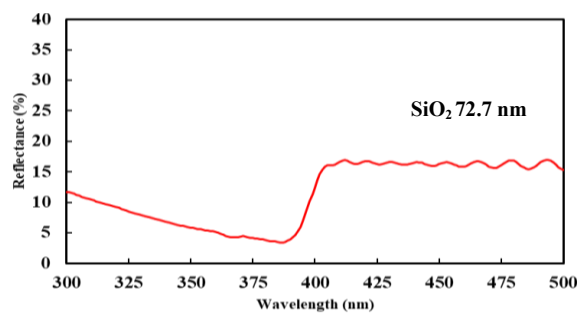


Fig.3. Reflectance vs. laser wavelength

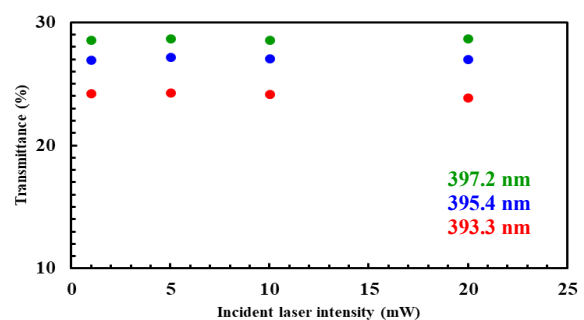


Fig.4. Transmittance vs. laser power

Fig.3 より SiO₂ 反射防止膜による近紫外領域での反射率の低減に一定の効果がみられた。Fig.4 の InGaN 吸収層の透過率は入射波長が短くなるほど低くなった。また、入射強度に依らず透過率は波長ごとに一定の値を示した。

3. Acknowledgments

本研究は NEDO 先導研究プログラム (JPNP14004)の支援を受けて実施された。

4. Reference

- [1] M. Miyoshi, et al., AIP Advances,11,9(2021)
- [2] M. Koga et al, SPIE Paper 12886-24 (2024)

DBR 構造を持つ光無線給電用 InGaP 太陽電池の温度特性

Temperature characteristics of InGaP solar cells with DBR structure for optical wireless power transmission

千葉工業大学¹, 国立研究開発法人情報通信研究機構² ○(M2) 高橋 龍成¹, 鈴木 淳一¹,
川村 駿介¹, 赤羽浩一², 内田史朗¹

Chiba Institute of Technology¹, National Institute of Information and Communications Technology²,
○Ryusei Takahashi¹, Junichi Suzuki¹, Shunsuke Kawamura¹, Kouichi Akahane², Shiro Uchida¹

E-mail: s19a3063ct@s.chibakoudai.jp

1. 背景

光無線給電は自動車や搬送ロボットなどの移動体への新たな電力供給方法として注目されている。また、InGaP 太陽電池は水中での透過率が高い可視光領域の波長を吸収しやすいことから、水中光無線給電への応用も期待されている。我々は、DBR 構造を持つ InGaP 太陽電池に 638nm のレーザーを 17.0W/cm² 照射した場合、43.0% という高い変換効率を報告してきた[1]。機器への実装や水中で応用する場合、温度変化によって DBR 層の反射率が左右にシフトしてしまうことが懸念される。本実験では InGaP 太陽電池の各温度における短絡電流 I_{sc} を測定し、温度変化による DBR 層の反射率の変化を調査した。

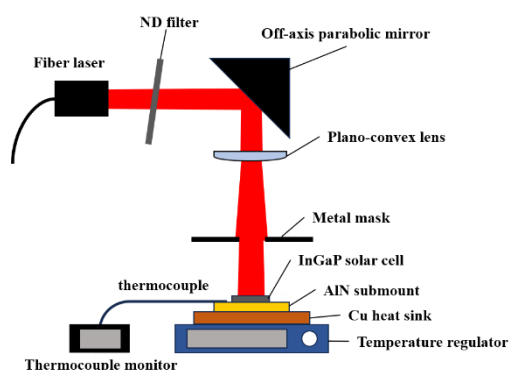


Fig.1 Experimental configuration

2. 実験方法

図 1 に実験概要図を示す。DBR 構造を持つ InGaP 太陽電池の温度を 20℃～60℃まで 10℃刻みで変化させ、波長 638 nm のファイバレーザを 100 mW で照射し、 I_{sc} を測定した。

3. 結果と考察

図 2 に InGaP 太陽電池の各温度における I_{sc} の変化を示す。図 2 から InGaP 太陽電池の温度が変化しても I_{sc} は変化しないことが分かった。このことから、温度変化がある環境下でも使用できると考えられる。

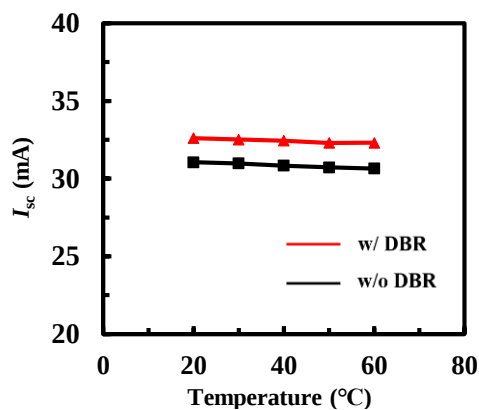


Fig.2 I_{sc} of InGaP solar cells at various temperatures

参考文献

[1] Y. Komuro et al, “A 43.0% efficient GaInP photonic power converter with a distributed Bragg reflector under high-power 638nm laser irradiation of 17 Wcm⁻²” Appl. Phys. Express 2021, 14, 052002.

光ファイバー給電用 3 接合型 InGaAs 太陽電池の温度依存性

Temperature dependency of 3-junction InGaAs solar cells for optical fiber power transmission

青山 怜央¹, 鈴木 淳一¹, 千葉 萌翔¹, 渋井 駿昌¹, 渡邊 康祐¹, 割ヶ谷 凌太¹,
赤羽 浩一², 内田 史朗¹

Reo Aoyama¹, Junichi Suzuki¹, Moeka Chiba¹, Shunsuke Shibui¹, Kousuke Watanabe¹, Ryota Warigaya¹,
Kouichi Akahane², and Shiro Uchida¹

¹Chiba Institute of Technology, ²National Institute of Information and Communications Technology

E-mail: s20A3002HY@s.chibakoudai.jp

(背景)

現在、光ファイバー給電用受光素子として InGaAs 太陽電池が活発に研究されている。長波長帯レーザを受光する太陽電池は、バンドギャップエネルギーが低いため開放電圧が低くなるが、同じ材料で多接合化する事で開放電圧を増加させること可能である[1]。本研究では、光通信で使用されている 1550 nm 光を受光する単接合 InGaAs 太陽電池(1J)と 3 接合 InGaAs 太陽電池(3J)を作製し、高効率化に向けた課題検討として素子の高温特性を評価した。

(実験結果)

1550nm のレーザ光を照射し素子の温度を 25℃から 80℃まで変化させて、太陽電池素子の光電変換効率と短絡電流の変化率をまとめた結果を図 2 に示す。

室温 25℃で 250 mW 照射に 3J で最大変換効率 23.4% が得られたが、温度を上げる変換効率は減少した。また、1J の変換効率も高温化するにつれて低下し、短絡電流 I_{sc} は 1J は増加したが 3J では減少した。

1J の I_{sc} が増加したのは温度上昇によるバンドギャップの低下によるものだと考えられる。3J の場合は、室温では 1550 nm 光照射時に各サブセルで発生する電流が整合していたが、温度上昇により電流ミスマッチが生じた為に短絡電流が低下し変換効率が低減したと推定される。

参考文献 : [1]. Wang, A, et al Applied Physics Letters, 2022, 119(24).

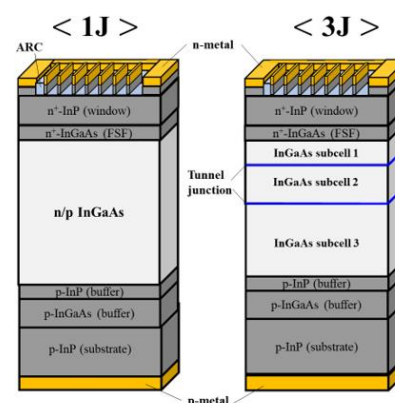


Fig.1. Schematic diagram of 1J and 3J InGaAs cell

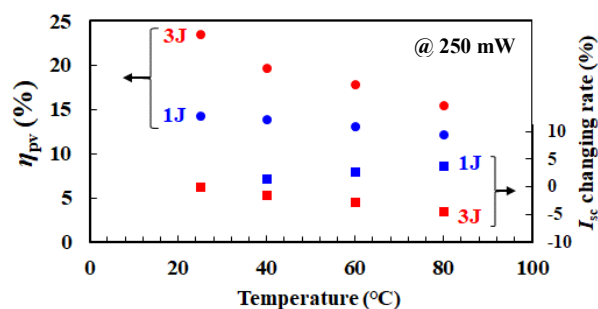


Fig.2. I_{sc} and η_{pv} vs. the temperature of cell

InGaAs 熱光起電力発電セルに向けたパターン化誘電体裏面電極の作製

Fabrication of patterned dielectric back contacts for InGaAs thermophotovoltaic cells

埼玉大院理工¹, 産総研², 東北大院工³, [○](M2)伊達 仁基^{1,2}, 大島 隆治²,

庄司 靖², 斎 均², 清水 信³, 菅谷 武芳², 八木 修平¹, 矢口 裕之¹

Saitama Univ.¹, AIST², Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.³, [○](M2)M. Date¹, R. Oshima²,

Y. Shoji², H. Sai², M. Shimizu³, T. Sugaya², S. Yagi¹, H. Yaguchi¹

E-mail: m.date.240@ms.saitama-u.ac.jp

【研究背景】熱光起電力発電(TPV)は、1000-2000°Cに加熱されたサーマルエミッタからの熱輻射光を用いて太陽電池(PV)セルで発電する技術である。In_{0.53}Ga_{0.47}As は TPV セルに適した材料として活発に研究されており[1]、我々はこれまでセル構造の最適化[2]や低直列抵抗化[3]を行ってきた。TPV 変換効率は、セルへの入射強度からサーマルエミッタへの反射強度を引いた実効的な強度に対するセルの発電電力で定義される。更なる高効率化には、サブバンドギャップの光子を透過や寄生吸収による損失を抑えてサーマルエミッタへ反射し、再加熱へ利用することが重要である。図1は輻射源を1400 Kの黒体輻射としてPVセルのE_gに対するTPV変換効率をShockley-Queisser 限界から求めたものであり、裏面反射率が向上することで変換効率が向上することが明らかである。そこで今回、高反射率を実現するためにInGaAsセル裏面にパターン化したSiO₂膜を用いた点接触構造(PDBC)[4]を形成し、TPVが動作を行う高電流密度で評価した。

【実験】MBE法を用いて2インチInP(001)基板上に、文献[2]と同構造のInGaAs逆積みリアヘテロ接合型セルを形成した。まず、逆積みセル上にフォトリソグラフィを用いてパターン化した350 nm厚のSiO₂を形成し、Ti/Auを堆積することでPDBCを作製した。その後、Si支持基板上にエポキシを用いて接着し、化学エッチングによりInP基板を除去した。さらに表面には、Ti/Au(3 μm)からなる電極を形成した。作製したセルは集光測定装置により評価した。

【結果と考察】図2は点接触の直径が4 μmと12 μmである場合の反射率の結果である。PDBCがない場合を基準セルとして示している。点接触の間隔は35 μmに固定した。1700 nmから2300 nmまでの平均反射率は直径4 μmで95.4%、直径12 μmで79.7%、基準セルは85.9%であった。直径4 μmでは期待通りに反射率が最も高かったが、直径12 μmでは干渉の影響で基準セルより反射率が小さくなった。図3は集光測定から得られた短絡電流密度(J_{sc})に対して曲線因子(FF)をプロットしたものである。基準セルは約1 A/cm²でFFが最大値となり、これは1400 KまでのTPV動作に問題がないことを示している。対して、直径4 μmや12 μmの点接触ではFFが約0.1 A/cm²で最大値となった。これはPDBCにより直列抵抗が増加したことを示唆しており、TPV応用には、PDBCの直列抵抗の更なる低減が重要となる。[1] Z. Omair et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116**, 15356 (2019). [2] R. Oshima et al., *J. Cryst. Growth* **593**, 126769 (2022). [3] 伊達仁基, 他, 第71回応用物理学会春季学術講演会予稿, 24p-P06-2, (2024). [4] M. K. Arulanandam et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **238**, 111545 (2022).

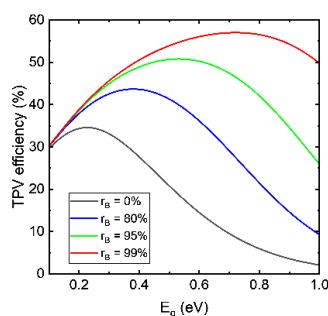


Fig. 1: TPV efficiency as a function of E_g of the PV cell with different reflectance (r_B).

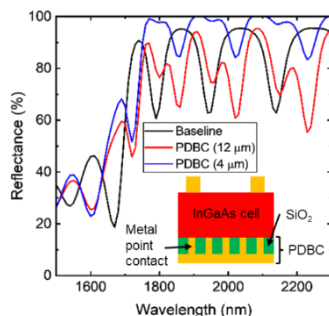


Fig. 2: Reflectance spectra for InGaAs cells with different back contact structures.

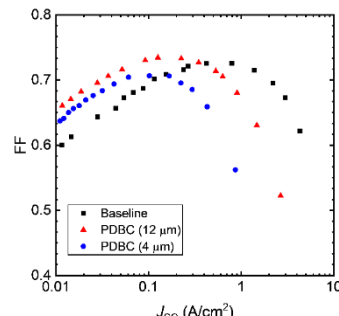


Fig. 3: FF as a function of J_{sc} for InGaAs cells with different back contact structures.

ガンマ線検出器応用 InGaP 太陽電池における電子線誘起電流劣化の評価

Study on Radiation Degradation of Electron-Induced Current in an InGaP Solar Cell

Type Gamma-ray Dosimeter

三条市大¹, 宇宙機構², 理研³ ○今泉 充¹, 中村徹哉², 奥野泰希³

Sanjo City Univ.¹, JAXA², RIKEN³

○Mitsuru Imaizumi¹, Tetsuya Nakamura², Yasuki Okuno³

E-mail: imaizumi.mitsuru@sanjo-u.ac.jp

1. 緒 言

InGaP 太陽電池は耐放射線性に優れ, 宇宙用3接合太陽電池のトップサブセルとして用いられている. 我々は, γ 線入射で生ずるコンプトン電子による誘起電流を信号として用いることで, InGaP 太陽電池を γ 線検出器に応用することを提案している. 用途として, 福島第1原発の廃炉作業に向けた損壊原子炉施設内における γ 線検出を検討している. しかし, この電子は電流を誘起すると同時に放射線損傷を起こし, 誘起電流は劣化/低下する. 従って劣化率に応じた電流値の較正が必要となると考えられる. 一方で, この検出器を高線量施設内に常設すると, 劣化率把握・較正のための取外し作業は不可能となる. そこで, この状態で唯一測定可能である暗状態電流-電圧 (DIV) 特性により, InGaP 太陽電池素子の劣化を推定する方法を確立すべく, まず電子線損傷による電子線誘起電流 (EIC) および DIV 特性の変化を実験的に確認した.

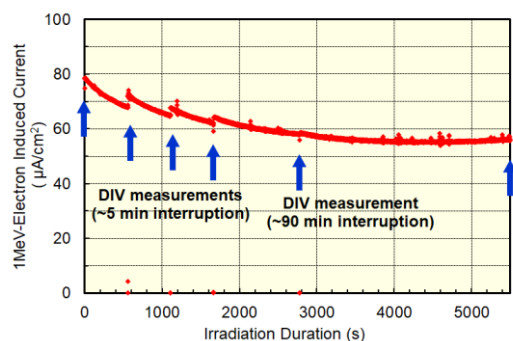
2. 実 験

試料はベース層厚 $1\ \mu\text{m}$ の InGaP 太陽電池 (サイズ: $1\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$) である. この太陽電池に対し, QST 高崎研にて $1\ \text{MeV}$ 電子線 (電流密度: $2.9 \times 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$) を暗状態で照射した. 試料温度は室温成行である. 電子線照射中に EIC のその場測定を行い, その途中所定フルエンス (① 1.0×10^{15} , ② 2.0×10^{15} , ③ 3.0×10^{15} , ④ $5.0 \times 10^{15}\ \text{e}^-/\text{cm}^2$) 到達時に照射を止めて DIV 特性をその場測定した. DIV 測定+照射再開の時間は①~③が約 5 min, ④が約 90 min, 最終フルエンスは $1.0 \times 10^{16}\ \text{e}^-/\text{cm}^2$ である.

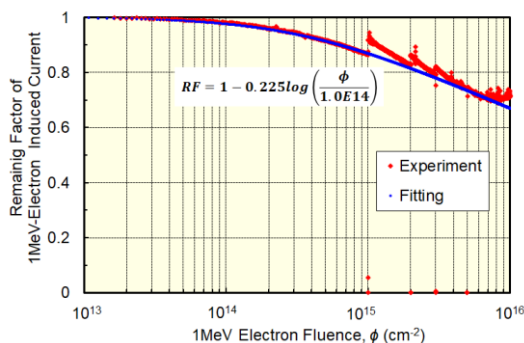
3. 結 果

図 1(a)に $1\ \text{MeV}$ 電子線照射中の EIC の時間的变化を示す. 低照射量領域 (フルエンス $\leq 3.0 \times 10^{15}\ \text{e}^-/\text{cm}^2$) にて DIV 測定のための照射中断中 (青矢印, その時間は横軸に含まず) に EIC の回復が観察された. よってこの劣化傾向には劣化と回復の両者が含まれていると考えられる. 図 1(b)は EIC の保存率 (初期値で規格化) をフルエンスでプロットしたものである. 前記回復分を無視すると, 劣化傾向は太陽電池出力の放射線劣化を表す関係式 (図中に示す) でフィッティングできる (青線) ことがわかった. 一方, 取得した DIV 特性のダイオード因子 n , 逆方向飽和電流値 I_0 には EIC の劣化との明確な関係が見られなかった. 電子線による試料温度上昇と回復がその主因と考えられる. DIV と EIC の相関化には, EIC の回復特性の把握および試料温度制御下での EIC 取得が必要と判断した.

※本研究は, 文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業」の一部として実施した.



(a) Induced current as a function of irradiation duration



(b) Remaining factor as a function of irradiation fluence

Fig. 1. Degradation tendency of $1\ \text{MeV}$ electron induced current (EIC) of the InGaP solar cell device. Figs. 1 (a) and (b) exhibit the change of EIC as a function of irradiation duration and the remaining factor of EIC as a function of fluence, respectively.

常温接合による異種半導体接合の低抵抗化

Reducing bonding resistance between dissimilar semiconductor materials using room temperature wafer bonding method

千葉工業大学¹, 情報通信研究機構² ○藤井駿太郎¹, 青山怜央¹, 西舘優太¹, 千葉萌翔¹, 藤原柊人¹, 斎藤圭胡¹, 菊地隆雅¹, 渡邊康祐¹, 赤羽浩一², 内田史朗¹

Chiba Institute of Technology.¹, National Institute of Information and Communications Technology.²,

○Shuntaro Fujii¹, Reo Aoyama¹, Yuta Nishidate¹, Moeka Chiba¹, Shuto Fujiwara¹, Keigo Saito¹, Ryuga Kikuchi¹, Kosuke Watanabe¹, Kouichi Akahane², Shiro Uchida¹

E-mail: s20A3102xz@s.chibakoudai.jp

[背景] 近年、格子定数などの異なる材料を組み合わせた多接合太陽電池が常温接合法によって作製され高い光電変換効率が報告されており、異種基板の接合により各基板特有の機能を併せ持った新たな機能デバイスが日々研究されている[1,2]。

本実験では、異種半導体基板を用いて、実用化に向けた目標値である、接合界面抵抗値 $\rho_c \leq 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ を達成することを目的とした。

[実験方法] 本実験では、7 mm × 7 mm の半導体基板を用いて、高速原子ビーム(Fast Atom Beam : FAB)照射の印加電圧をパラメータとして接合実験を行った。接合にはオーミック電極を備えた p-InP 基板上の p-InGaAs($1 \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), n-GaAs($2 \sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)の基板を準備し、接合実験を行った。図1に p-InGaAs // n-GaAs の接合概要図を示す。

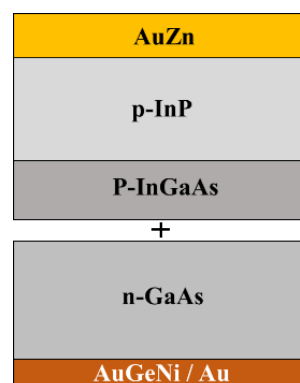


Fig.1. Bonding structure of p-InGaAs // n-GaAs

[結果および考察]

図2に J - V 特性を示す。p-InGaAs // n-GaAs の J - V カーブはオーミックに近い接触となった。図2から、FABの印加電圧を1.5 kV から1.0 kV へと変化させる事で接合界面抵抗が低減している事が分かる。FABの印加電圧を低下させることで、表面の平坦性が改善し強固な接合が形成されたと推定している。

[謝辞] 本研究の一部は、JSPS 科研費(JP22K04202)の助成を受けたものです。

[参考文献]

- [1] F. Dimroth *et al.*, IEEE journal of photovoltaics, vol. 6, No. 1, January 2016
- [2] P. Dai *et al.*, Applied Physics Express 9, 016501 (2016)

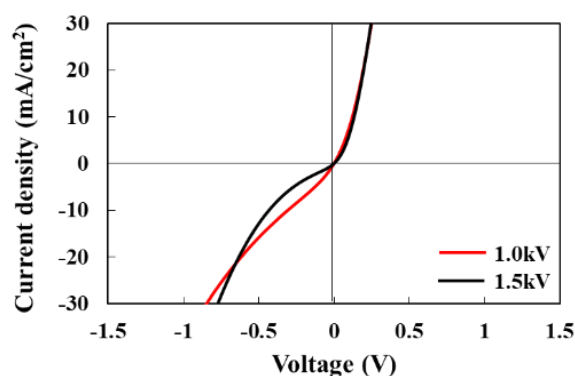


Fig.2. J - V characteristics of p-InGaAs // n-GaAs

多接合 p-on-n 太陽電池に適用可能なウェーハ接合界面の電気的特性

Electrical properties of wafer-bonded interfaces applicable for multijunction p-on-n solar cells

ソダーバンル ハッサネット¹, 馬 徳璞², 渡辺 健太郎¹, 中野 義昭², 杉山 正和^{1,2}

H. Sodabanlu¹, D. Ma², K. Watanabe¹, Y. Nakano², M. Sugiyama^{1,2}

¹ 東大先端研 RCAST, The Univ. of Tokyo, ² 東大院工 School of Engineering, The Univ. of Tokyo

E-mail: sodabanlu@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp

1 Introduction

At the last spring meeting, we reported the successful fabrication of multi-junction solar cells (MJSCs) with a p-on-n configuration using a direct wafer bonding technique [1]. Subcells grown separately on InP and GaAs wafers were bonded together utilizing a heavily doped n-GaAs//n-InGaAs/p-InGaAs structure, where the notation // indicates the bonding interface. This structure resulted in a voltage loss of approximately 0.1 V under 1-sun operation. To enhance the performance of wafer-bonded p-on-n MJSCs, we investigated the electrical characteristics of bonded interfaces between various applicable material combinations in this work.

2 Experimental details, results and discussion

We investigated eight bonding combinations, including n-GaAs//p-InP, n-InGaP//p-InP, n-GaAs//p-InGaAs, n-InGaP//p-InGaAs, n-GaAs//n-InGaAs/p-InGaAs, n-InGaP//n-InGaAs/p-InGaAs, n-InGaP/p-AlGaAs//p-InGaAs, and n-InGaP/p-AlGaAs/p-InAlGaP//p-InGaAs. The surface activated bonding technique was employed with optimized parameters: 1 minute of surface activation followed by 5 minutes of bonding under a pressure of 15 kN. Rapid thermal annealing (RTA) was used to anneal the bonded samples. Subsequently, GaAs wafers were selectively removed, and metal electrodes were deposited on both sides, with a front pattern of 0.04 cm² arrays, which were later electrically isolated using high mesa etching. Figure 1 depicts the sample structure having the n-

GaAs//p-InGaAs interface.

Initially, it was observed that two combinations involving p-InP exhibited weak bonding strength, allowing the bonded samples to be easily separated with minimal force. Consequently, this hindered the GaAs wafer removal process. Among the remaining six combinations, rectified I-V characteristics were observed, each with distinct turn-on voltages corresponding to the choice of materials. Post-annealing at 450-550°C for 5 minutes proved effective in enhancing the ohmic properties of the bonded interfaces. However, annealing at 600°C resulted in the formation of cracks and line defects along the [011] direction in thin films deposited on the GaAs side, leading to degraded I-V characteristics. The I-V results from the n-GaAs//p-InGaAs sample are illustrated in Fig. 2, with additional findings to be presented during the upcoming meeting, including their potential applications in practical MJSCs.

3 Summary

We explored several bonding combinations suitable for p-on-n MJSCs. Post-annealing was essential to enhance the I-V characteristics of the bonded interfaces, although it could also introduce line defects that degrade electrical performance.

[1] H. Sodabanlu et al, 71st JSAP Meeting, 23a-12L-1.

A part of the results of this study is based on a project, JPNP20015, commissioned by NEDO.

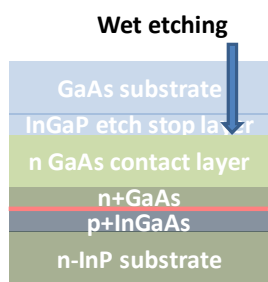


Fig. 1 Schematic of n-GaAs//p-InGaAs sample

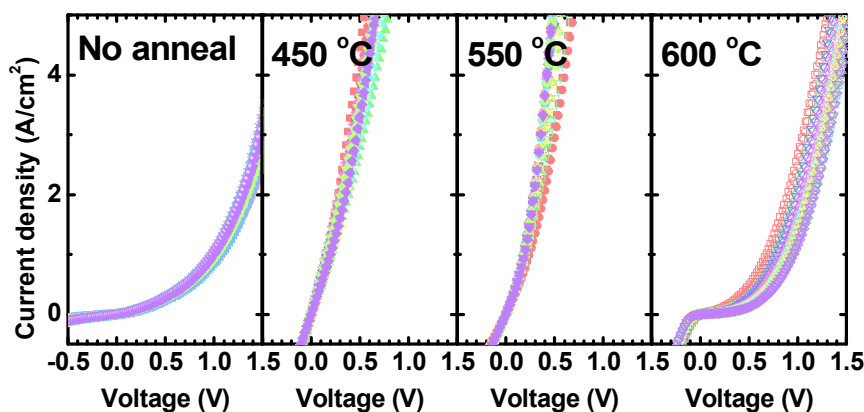


Fig. 2 I-V characteristics of n-GaAs//p-InGaAs sample without and with post annealing

電流不整合の改善による InGaP/GaAs/In_xGa_{1-x}As//In_yGa_{1-y}As
4 接合太陽電池の高効率化

Efficiency enhancement of InGaP/GaAs/In_xGa_{1-x}As//In_yGa_{1-y}As four-junction solar cells
by improving current mismatch

東大工¹, 東大先端研², [○](M2)島崎 嵩士¹, 渡辺 健太郎², ソダーバンル ハッサネット²,
中野 義昭¹, 杉山 正和^{1,2}

The Univ. of Tokyo¹, RCAST², [○]Takashi Shimasaki¹, Kentaroh Watanabe², Hassanet Sodabanlu²,
Yoshiaki Nakano¹, Masakazu Sugiyama^{1,2}

E-mail: shimasaki@enesys.rcast.u-tokyo.ac.jp

近年 III-V 族多接合太陽電池による太陽電池の高効率化が進み、現在の最高効率は 665 倍の集光下で 47.6%である[1]。しかし高効率を達成している 4 接合以上の多接合太陽電池では最適なバンドギャップの組み合わせを得るために InGaAsP などの 4 元混晶が必要であり、安定的に高品質な結晶成長を行うことが難しい。本研究では非集光下で 37.9%を実現した InGaP/GaAs/In_xGa_{1-x}As 逆積み 3 接合太陽電池(IMM3J)[2]と開放電圧の大きいヘテロ接合を持つ In_yGa_{1-y}As 太陽電池の表面活性化接合により、4 元混晶を含まない InGaP/GaAs/In_xGa_{1-x}As//In_yGa_{1-y}As 4 接合太陽電池(SAB4J)の開発に取り組んだ。

最初に作製したサンプル(SAB4J-α)では電流電圧特性の 1.5 V 以上の領域において光電流の減少が見られ、効率が低かった。これは IMM3J と In_yGa_{1-y}As の電流が整合せず、全体の電流が電流の小さい 4 層目の In_yGa_{1-y}As に制限されているためであると考えられる。そこで、4 層目の In_yGa_{1-y}As で発生する電流を増やすために次のサンプルでは IMM3J の薄膜化と 4 層目にフロントヘテロ構造を持つ In_yGa_{1-y}As の導入を行いサンプルの試作に取り組んだ(SAB4J-β)。その結果、不完全だが電流の減少を大きく抑えることに成功した。さらに、SAB4J-β の 3 層目の In_xGa_{1-x}As のバンドギャップを 1.0 eV から 1.05 eV に変えることで電流整合を目指した(SAB4J-γ)。その結果、電流整合する SAB4J を作製することに成功した。しかし、開放電圧は SAB4J-αや SAB4J-βに比べて減少することが判明した。これはバンドギャップを変えた IMM3J のメタモルフィックバッファ層が最適化されていないことに起因すると考えられる。

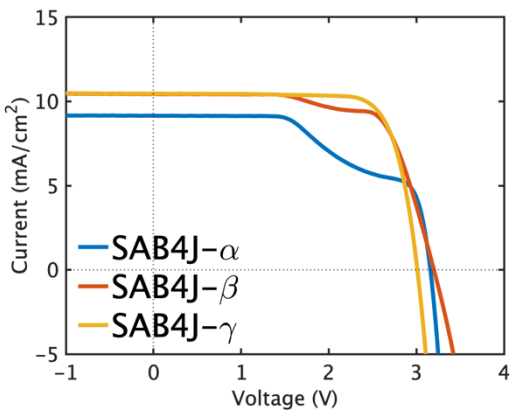


Fig. 1: Current-Voltage Characteristics under AM1.5G

Table 1: Photovoltaic performances of each SAB4J

sample	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	Efficiency (%)
SAB4J-α	9.2	3.16	51.8	15.0
SAB4J-β	10.4	3.20	70.0	23.4
SAB4J-γ	10.5	3.01	77.3	24.4

[1] H. Helmers *et al.*, *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XIII*, vol. 12881, pp. 6-15, SPIE, 2024.
[2] T. Takamoto *et al.*, *Proc. 40th IEEE photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp.0001-0005, 2014.

太陽電池における理想係数の集光度依存性の解明

Dependence of diode's ideality factor on incident light intensity in solar cells

東大先端研¹, 東大工² °浅見 明太¹, 渡辺 健太郎¹, 中野 義昭², 杉山 正和^{1,2}RCAST¹, The Univ. of Tokyo², °Meita Asami¹, Kentaroh Watanabe¹, Yoshiaki Nakano²,Masakazu Sugiyama^{1,2}

E-mail: meita-asami@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Optoelectronic Reciprocity theorem は、太陽電池の開放電圧と外部発光効率の関係を定式化した定理である[1]。この定理は、重ね合わせの法則(superposition rule)が成り立つことを前提としている。重ね合わせの法則とは、太陽電池のダイオード特性は、光照射下でも暗状態でも同一である、という法則である。しかし、実際の太陽電池では、この法則は厳密には成り立たないことが多い。本研究の目的は、光照射下における太陽電池のダイオード特性が暗状態と比べてどのように変化するかを調べ、その物理を解明することである。

励起レーザー光強度を変化させて量子構造太陽電池の電流-電圧 (J-V) 特性を測定し、その後、J-V 曲線の傾きからダイオードの理想係数を算出した (Fig. 1)。ダイオードの理想係数は、光強度が増加するにつれて増加した。寄生抵抗成分も含めてより詳細に解析し、発表では理想係数の算出方法についても詳述する。また、本研究では、エレクトロルミネッセンス (EL) とフォトルミネッセンス (PL) の発光の違いについても解明を試みる。EL では電流によってキャリアが注入され、PL では光励起によってキャリアが注入される。EL と PL とでは太陽電池内のキャリア分布が異なり、この違いが Optoelectronic Reciprocity theorem やダイオードの理想係数をはじめとした太陽電池の特性に影響を与える。Fig. 2 に EL と PL の測定結果を示す。PL 発光は EL 発光よりも強い結果となった。なお、PL 測定は開放状態で行ったが、この EL と PL との比較が適切かどうかは未解明である。EL と PL の結果をどのように比較すれば良いかは全く自明ではなく、本発表では PL 発光のバイアス電圧依存性も示し、光照射下における太陽電池のダイオード特性、ならびに、EL と PL の比較方法について考察する。

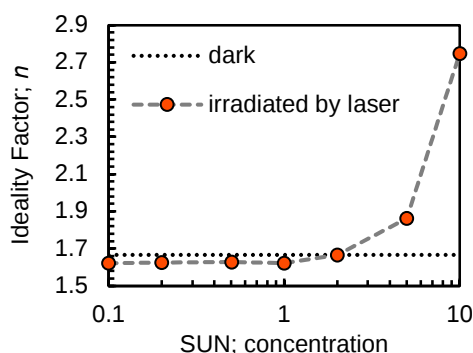


Fig. 1: 集光度とダイオードの理想係数との関係。

黒い点線は暗状態時の理想係数

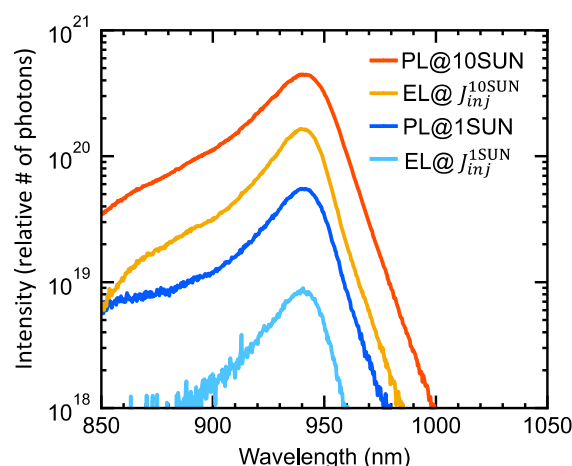


Fig. 2: EL と PL との比較。

[1] U. Rau, *Phys. Rev. B* **76**, 085303 (2007).

GON 構造形成に向けた Ge の異方性エッチングとアニール処理の検討

Anisotropic etching and annealing for germanium-on-nothing structure

埼玉大学¹, 産総研², ○(M2) 范 文博¹, 大島 隆治², 庄司 靖², 菅谷 武芳²,
八木 修平¹, 矢口 裕之¹

Saitama Univ. ¹, AIST², ○(M2) Wenbo Fan¹, Ryuji Oshima², Yasushi Shoji², Takeyoshi Sugaya²,
Shuhei Yagi¹, Hiroyuki Yaguchi¹

E-mail: han.b.214@ms.saitama-u.ac.jp

【研究背景】Germanium-on-nothing (GON) 技術による基板再利用法は、III-V 族太陽電池のコストを大幅に低減することができるアプローチとして注目されている[1, 2]。GON 形成プロセスは、Ge 基板の高アスペクト比の異方性エッチングと適切なアニールによる Ge 原子の表面拡散で構成され、それらにより表面 Ge 層と下方のボイド層を形成する。本発表では、Ge の異方性エッチングのエッチング深さと GON 構造形成の関係を検討した。

【実験】i 線ステッパーを用いて Ge (001) 基板上のレジスト膜に直径 1.0 μm の円形ホールパターンを形成した。その後、深掘りエッチング(DRIE)装置を用いた Bosch process によりホール部のエッチングを行った。Bosch process を 100 サイクル、250 サイクル行った結果、ホールパターンのエッチング深さはそれぞれ 4.0 μm と 9.1 μm となった。エッチングプロセス後はサンプルを水素雰囲気下、800°C でアニールを行った。各試料、プロセスでの断面構造は走査電子顕微鏡(SEM)により評価した。

【結果と考察】Fig. 1 (a), (b)はそれぞれ 4.0 μm 、9.1 μm の深さでエッチングした構造の断面 SEM 像である。両者ともホール部の直径はマスクサイズと同等の 1.0 μm であり、サイドエッチングが Bosch process により効果的に抑えられていることを確認した。本結果により、9 以上の高アスペクト比の異方性エッチングが実現できた。Fig. 1 (c), (d)は各試料のアニール後の断面 SEM 像であり、アニールによって表面が変形し、平坦な Ge 表面層が形成した。これは表面エネルギーが最小となるように Ge 原子が表面拡散した結果だと考えられる。また、深さ 4.0 μm の試料では表面 Ge 層の下方に柱状ボイドが形成されたが、深さ 9.1 μm の試料では板状ボイド層が形成された。これはアスペクト比が高いことに起因して、形成された柱状ボイドの直径がホールパターンのピッチ間隔よりも大きくなったため、隣り合う柱状ボイドが繋がった結果だと考えられる。今回のプロセスでエッチング深さ 9.1 μm のホールパターンを形成した 3.5 mm 角の領域全体で、表面 Ge 層を粘着フィルム上への剥離転写ができることを確認した。

【謝辞】本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号：JPMXP1224AT0037, JPMXP1224NM0073）の支援を受けた。

[1] S. Park et al., *Joule* **3**, 1782 (2019). [2] V. Depauw et al., *Prog. Photovoltaics. Res. Appl.* **31**, 1315 (2023).

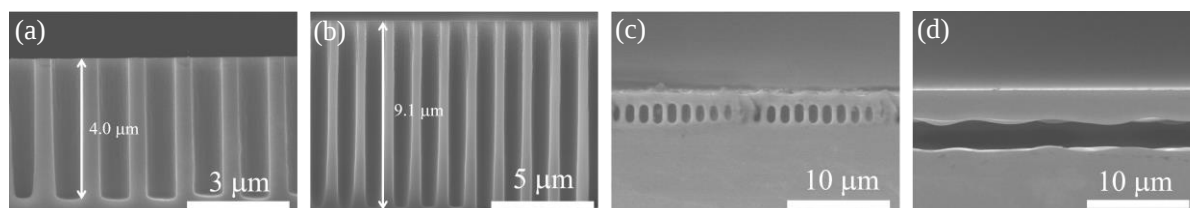


Fig. 1 Cross-sectional SEM images of Ge samples with hole patterns with depths of (a) 4.0 μm and (b) 9.1 μm . (c) and (d) show cross-sectional SEM images of samples in (a) and (b) after annealing at 800°C under hydrogen ambient.