

# Modelowanie ogniw słonecznych w oparciu o CIGS z defektami wdrożonymi w głównych warstwach

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano aktualny stan badań eksperymentalnych i symulacji elementów słonecznych (ES) opartych na  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (CIGS) oraz omówiono sposoby zwiększenia efektywności. Podano wyniki symulacji ogniw słonecznych opartej na CIGS w programie SCAPS-1D. Wprowadzenie różnego rodzaju defektów oraz dodatkowego materiału warstwowego pozwoliło uzyskać wysokie wartości cech ES.

**Abstract.** The article analyzes the current state of experimental research and simulation of solar elements (SE) based on CIGS and discusses ways to increase efficiency. The results of the simulation of solar cells based on CIGS in the SCAPS-1D program are given. (Modeling solar cells based on CIGS with defects deployed in the main layers)

**Słowa kluczowe:** defekty w strukturze ES, uporządkowany materiał warstwowy, efektywność elementu słonecznego.

**Keywords:** defects in the SE structure, ordered layered material, efficiency of the solar element.

## Wstęp

Według National Renewable Energy Laboratory (NREL) sprawność ogniw słonecznych II generacji, które wykorzystują technologię cienkowarstwową, zbliża się do około 22-24%. Możemy zwiększyć wydajność ogniwa słonecznego, stosując drogie technologie, takie jak na przykład koncentratory, teksturowanie powierzchni, tworzenie struktur kaskadowych lub zastosować prostsze podejście, polegające na wprowadzeniu defektów do struktury ogniwa fotowoltaicznego [1].

Obecnie istnieje wiele rodzajów paneli słonecznych, na przykład, krzemowe mono- i polikrystaliczne, CdTe,  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (CIGS), na bazie perowskitu. Ogniwa słoneczne (CE) II generacji o grubości warstw 1-3 mikrony, bardzo dobrze nadają się do wprowadzania defektów i zwiększania sprawności [2].

Ogniwa słoneczne oparte na CIGS są interesujące do przeprowadzenia badań, ponieważ posiadają one bardzo wiele zalet. Do nich należą między innymi:

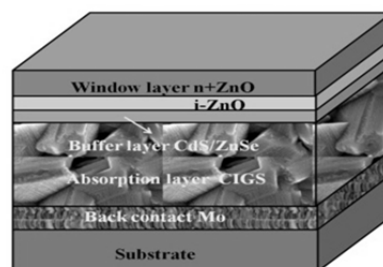
- ✓ niski koszt produkcji paneli słonecznych;
- ✓ CIGS ma wyższy współczynnik absorpcji w porównywaniu z innymi półprzewodnikami, co prowadzi do znacznie mniejszej grubości folii, przy zapewnieniu tego samego poziomu absorpcji;
- ✓ większa odporność na promieniowanie w porównaniu z innymi ogniwami fotowoltaicznymi [3].

Podobnie jak inne cienkowarstwowe ogniwa słoneczne, CIGS można osadzać na elastycznych podłożach. Jednak ze względu na specyfikę mechanizmu osadzania, najwyższą wydajność uzyskuje się przy osadzeniu na szklanym podłożu.

Pasma wzbronione  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  mieści się w zakresie od 1,04 do 1,68 eV [3]. Szerokość pasma wzbronionego można regulować zawartością galu w związku chalkopirytowym. Profil pasma zabronionego jest płaski, co jest pozytywną cechą półprzewodnika. Jeśli materiał ma wysoki współczynnik absorpcji, fotony muszą pokonać bardzo krótką odległość, aby zostały wchłonięte. Ponieważ CIGS jest związkiem chemicznym wieloskładnikowym, dlatego wprowadzanie defektów jest bardzo złożoną procedurą, w której bezpośrednia ich kontrola jest skomplikowana.

Element słoneczny (ES) oparty na CIGS składa się zazwyczaj z następujących głównych warstw:

- ✓ Okno (zwykle  $n+\text{ZnO}$  i  $i+\text{ZnO}$ );
- ✓ Bufor (półprzewodnik typu  $n$ );
- ✓ Absorbent (typu  $p$  – CIGS);
- ✓ Kontakt metalowy;
- ✓ Podszewka



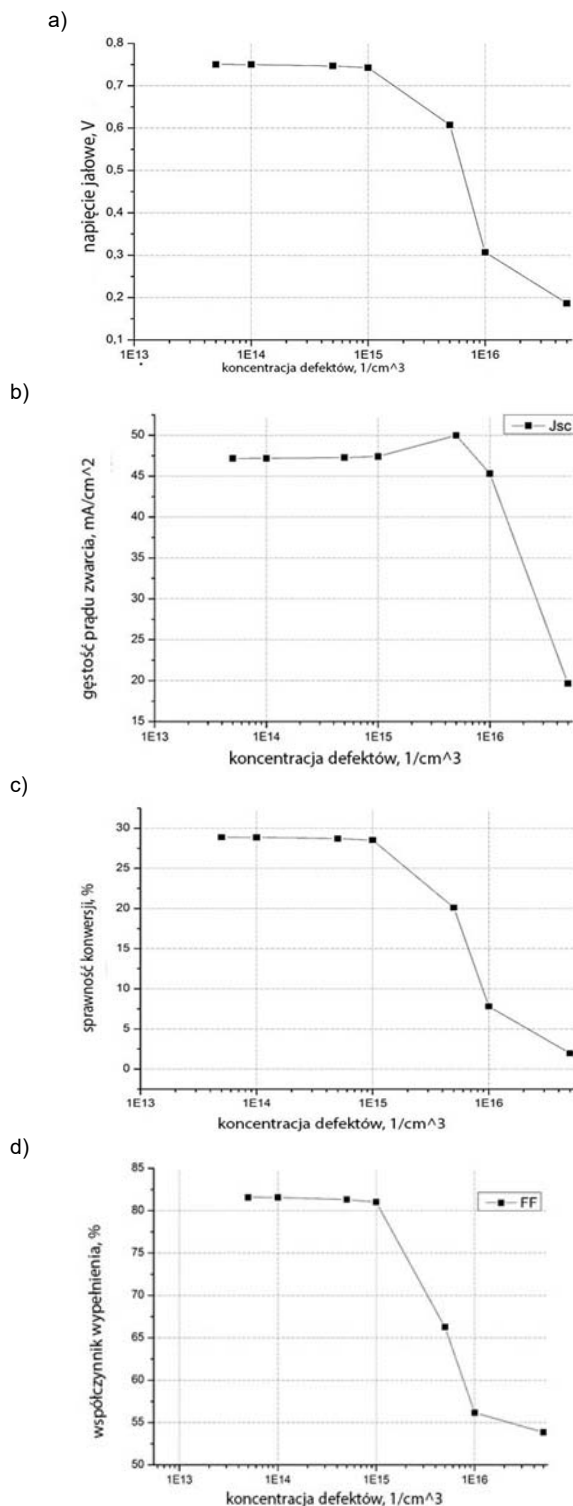
Rys. 1. Warstwowa struktura materiału fotowoltaicznego CIGS [4]

Na rys.1 pokazano warstwową strukturę materiału fotowoltaicznego CIGS. W górnej części materiału występuje aluminium zapewniające wysoką przewodność oraz przezroczysta warstwa ochronna. W warstwie buforowej często stosuje się CdS, jednak ze względu na ochronę środowiska wykorzystuje się materiały wolne od kadmu. Głównym celem zastosowania takiej warstwy jest zapewnienie stabilności strukturalnej fotokomórki oraz tworzenie par elektron-dziura. Główną warstwą ES jest warstwa absorpcyjna, której badania przedstawiono w dalszej części artykułu. Badania  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  wykazały, że zwiększenie ilości galu w tym związku zwiększa pasmo wzbronione oraz współczynnik efektywności. W warstwie absorbującej zachodzą procesy absorpcji światła i generowania nośników ładunku. Długość dyfuzji powinna być odpowiednia dla niezakłóconego wejścia niepierwotnych nośników ładunku do wyprowadzeń prądowych.

## Badanie i analiza wyników

Do obliczeń wybrano typowy element słoneczny oparty na CIGS. Taka fotokomórka zawiera warstwę absorpcyjną  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ , warstwę buforową CdS i warstwę przejrzystą ZnO. Dla kolejnych badań wprowadzono w strukturze warstw głównych różnego rodzaju defekty. W programie SCAPS-1D wprowadzono początkowe parametry określające właściwości fizyczne i chemiczne warstw oraz parametry defektów w każdej z warstw. Współczynniki absorpcji warstw badanych fotokomórek oraz model absorpcji wykorzystano z [5].

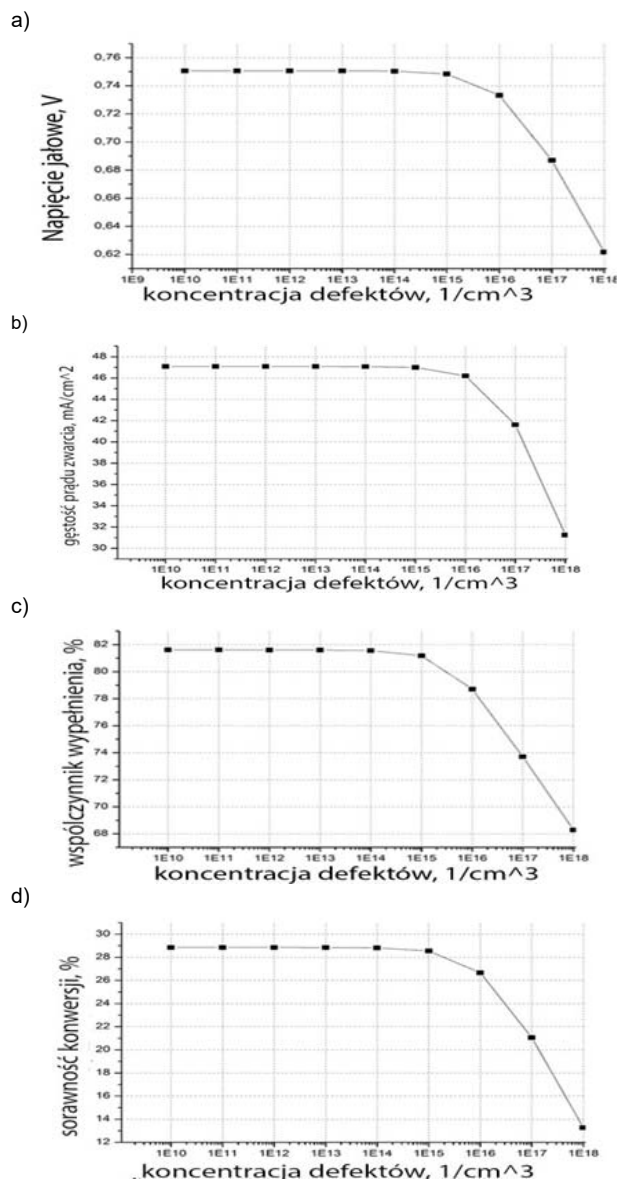
Pierwszym etapem modelowania było wprowadzenie w strukturę warstwy absorbującej prostego defektu typu donorowego. Koncentracja defektów wahała się od  $5 \cdot 10^{13}$  do  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Powierzchnia wychwytywania elektronów i dziur wynosiła odpowiednio  $10^{-15}$  i  $10^{-13} \text{ cm}^2$ . Wyniki symulacji przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Zależność napięcia jałowego (a), gęstości prądu zwarcia (b), współczynnika wypełnienia (d) i sprawności (c) od koncentracji defektów dawcy w warstwie absorbującej. [opracowanie własne]

Wprowadzenie defektu donorowego do warstwy absorbującej prowadzi do wzrostu prądu zwarcia przy koncentracji  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , jednak inne parametry zmniejszają się.

Następnym etapem modelowania było wprowadzenie do struktury warstwy absorbującej prostego defektu typu akceptorowego. Koncentracja defektów wahała się od  $5 \cdot 10^{13}$  do  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Powierzchnia wychwytywania elektronów i dziur wynosiła odpowiednio  $10^{-15}$  i  $10^{-13} \text{ cm}^2$ . Wyniki symulacji przedstawiono na rys.3.



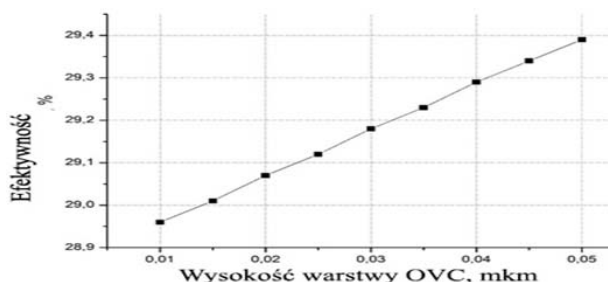
Rys. 3. Zależność napięcia jałowego (a), gęstości prądu zwarcia (b), współczynnika wypełnienia (c) i sprawności (d) od koncentracji defektu akceptora w warstwie absorbującej. [opracowanie własne]

Badania wykazały, że obecność defektu typu akceptorowego powoduje zmniejszenie głównych cech ogniwa słonecznego opartego na CIGS. Według wyników uzyskanych z modelu symulacyjnego, obecność defektu dawcy „donor” powierzchni prowadzi do zwiększenia współczynnika efektywności ogniw słonecznych. Napięcie biegu jałowego spada, natomiast prąd zwarcia wzrasta. Współczynnik wypełnienia i sprawność ES osiągają maksymalne wartości przy koncentracji defektów  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

Modelowanie wprowadzenia do ES warstwy OVC (Ordered Vacancy Compound), która została utworzona pomiędzy warstwą buforową CdS i warstwą absorbera CIGS. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że warstwa OVC jest korzystna dla wydajności elementów słonecznych, ponieważ złącze elektryczne jest odsunięte od powierzchni rekombinacji między CdS i CIGS, a zatem szybkość rekombinacji jest zmniejszona. W badaniach nie brano pod uwagę wpływu rezystancji szeregowej, rezystancji bocznikowej oraz pasma wzbronionego na styku różnych materiałów, ze względu na ich małe wartości [6].

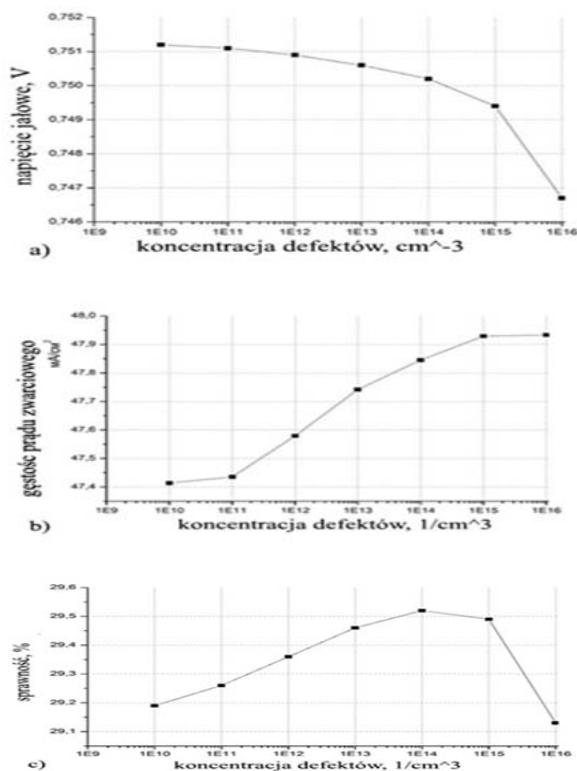
Głównym parametrem OVC jest grubość tej warstwy. Symulacje wykazały, że wraz ze wzrostem grubości

warstwy OVC obserwuje się wzrost wydajności ES. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że zbyt duże zwiększenie grubości warstwy OVC spowoduje zmianę struktury oraz właściwości ogniwa słonecznego opartego na CIGS, rys.4



Rys. 4. Zależność efektywności od wysokości warstwy OVC [opracowanie własne]

Modelowanie wykazało, że obecność defektu donora powierzchniowego poprawia charakterystykę ogniwa słonecznego. Napięcie jałowe spada, ale wzrasta prąd zwarciovowy. Na rys.5 pokazano zależności napięcia jałowego, gęstości prądu zwarciovowego, sprawności od koncentracji defektu donorowego na powierzchni CIGS. Przedstawiono również, że współczynnik wypełnienia i wydajność ES osiągają maksymalne wartości przy koncentracji defektów dla wartości  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$



Rys.5 Zależność napięcia jałowego (a), gęstości prądu zwarciovowego (b), sprawności (c) od koncentracji defektu donorowego na powierzchni CIGS [opracowanie własne]

## Wnioski.

1. Wprowadzenie defektów do głównych warstw elementu słonecznego opartego na CIGS prowadzi do obniżenia efektywności urządzenia, ze względu na wzrost rekombinacji niepiętnotnych nośników ładunku.
2. Wprowadzenie defektów do warstwy OVC przyczynia się do przesunięcia granicy rekombinacji na głębokość warstwy buforowej. Prowadzi to do wzrostu wydajności ES, około 29%.

## Autorzy:

dr Zinovi Kohut, Czestochowa University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electrical Power Engineering (1), Armii Krajowej Avenue 17, p.o. box 42-200 Czestochowa, Poland, e-mail: zenon.kogut@pcz.pl; ORCID: 1. 0000-0003-4895-8501

dr inż. Dariusz Calus, Czestochowa University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electrical Power Engineering (1), Armii Krajowej Avenue 17, p.o. box 42-200 Czestochowa, Poland, e-mail: dariusz.calus@pcz.pl; ORCID: 0000-0003-4224-7020

mgr Piotr Chabecki, Czestochowa University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electrical Power Engineering, Armii Krajowej Avenue 17, p.o. box 42-200 Czestochowa, Poland, e-mail: piotr.chabecki@pcz.pl; ORCID: 0000-0003-4857-8904

## LITERATURA

- [1] A. Kynlnera. Effect of impurities in the CdS buffer layer on the performance of the  $\text{Cu}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  thin film solar cell. Department of Materials Science, Angstrom Laboratory, Uppsala University, J. Appl. Phys. 85, 6858 (1999); doi: 10.1063/1.370204
- [2] A. Hultqvist, C. Platzer-Bjorkman, E. Coronel, M. Edoff. Experimental investigation of  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2/\text{Zn}(\text{O}_{1-x}\text{S}_x)$  solar cell performance. Solar Energy Materials and Solar Cells. Volume 95, Issue 2, February 2011, Pages 497-503.
- [3] Jixiang Zhou, Changyu Li. Research on Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Thin-Film Solar Cells. E3S Web of Conferences 267, 02031 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126702031>
- [4] Jingjing Qu, Linrui Zhang, Hao Wang, Xuemei Song, Yongzhe Zhang, Hui Yan. Simulation of double bufer layer on CIGS solar cell with SCAPS software. Optical and Quantum Electronics (2019). Vol. 51. Issue 12. 383
- [5] Istratov, A. A. et al. Nickel solubility in intrinsic and doped silicon. J. Appl. Phys. 97, 023505 (2005).
- [6] Marinopoulos, A. G., Santos, P. & Coutinho, J. DFT+U study of electrical levels and migration barriers of early 3d and 4d transition metals in silicon. Phys. Rev. B 92, 075124 (2015).