

**Lukasz Bartłomiej Chrobak**  
**Wiesław Ryszard Madej**  
**Mirosław Andrzej Maliński**  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

## **Realizacja stanowiska badawczego do mapowania wydajności prądowej ogniw fotowoltaicznych metodą LBIC**

**Słowa kluczowe:** krzem, fotowoltaika, ogniwa słoneczne, mapowanie ogniw, wydajność prądowa ogniw

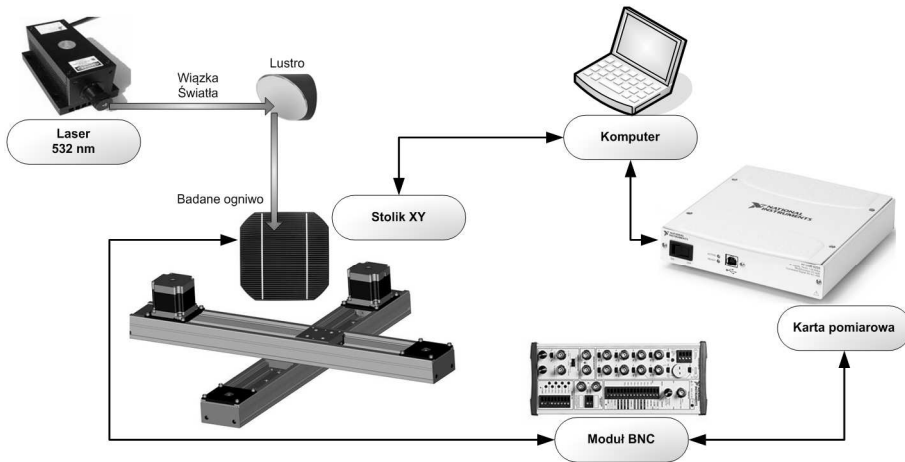
### **Wprowadzenie**

Odnawialne źródła energii pełnią w dzisiejszych czasach nieocenioną rolę. Jedną z dziedzin nauki zajmującą się pozyskiwaniem energii z odnawialnych źródeł jest fotowoltaika. Ważnym aspektem w zakresie fotowoltaiki są badania wydajności prądowej ogniw słonecznych. Na ich wydajność mają wpływ wszelakiego rodzaju defekty, np. jakość wykonania powierzchni ogniwa, zmiany drogi dyfuzji czy też wpływ rezystancji lokalnych. Typowymi metodami oceny ogniwa są: pomiary charakterystyk I-V [1-2], metoda termografii lock-in [3-4], metoda elektroluminescencji [5-6] czy też modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach [7-8]. W niniejszej pracy wykorzystaną metodą jest nieniszcząca technika indukowania prądu ogniwa wiązką laserową LBIC (*light beam induced current*) [9]. W metodzie tej wykorzystuje się szybkie skanowanie wiązką laserową w każdym punkcie powierzchni ogniwa, w wyniku czego następuje absorpcja i wzbudzenie elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Proces może jedynie zaistnieć, gdy energia fotonów wiązki sondującej jest większa od przerwy energetycznej krzemu (~1.1 eV). Wiązka skanująca wzbudza parę elektron – dziura w badanym złączu fotowoltaicznym. Następuje indukcja prądu, którego analiza umożliwi wyznaczenie właściwości badanego ogniwa, a w szczególności jego defekty. Metoda ta ma swoje początki w latach siedemdziesiątych [10-12]. W pierwszych badaniach wykorzystujących daną metodę elementem ruchomym było źródło światła, natomiast w późniejszych pracach zastosowano przesuwanie badanego

ogniwa [13-14]. Wykorzystanie silników krokowych umożliwiło szybkie i precyzyjne skanowanie ogniwa.

## Stanowisko badawcze

Schemat poglądowy stanowiska badawczego do pomiarów ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu wiązką laserową został przedstawiony na rysunku 1.



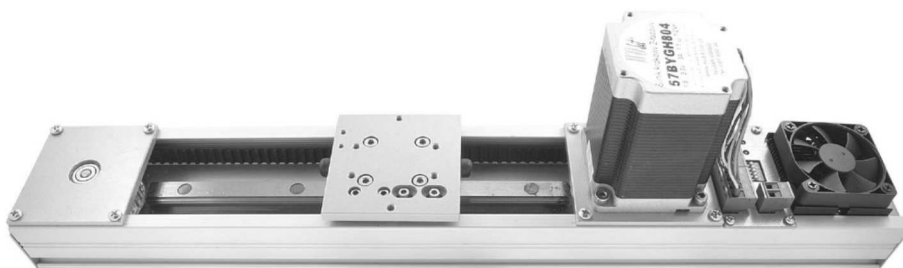
**Rys. 1.** Schemat poglądowy stanowiska badawczego do pomiarów ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu wiązką laserową

W skład stanowiska wchodzi laser wzbudzający o długości fali 532 nm i szerokości plamki nieprzekraczającej średnicy 1 mm, stolik XY zbudowany na bazie modułów MLA-K z silnikami krokowymi, szybka karta przetworników analogowo-cyfrowych NI USB-6255 wraz z modułem przyłączeniowym NI BNC-2120 oraz komputer osobisty. Fotografia przedstawiająca zrealizowane stanowisko badawcze została przedstawiona na rysunku 2.



**Rys. 2.** Fotografia stanowiska badawczego do pomiarów ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu wiązką laserową

Część wykonawcza stanowiska zbudowana jest z dwóch połączonych prostopadle modułów liniowych serii MLA z wbudowanymi silnikami krokowymi. Przykładowy moduł z serii MLA został przedstawiony na rysunku 3.



**Rys. 3.** Moduł liniowy serii MLA z wbudowanym sterownikiem silnika krokowego

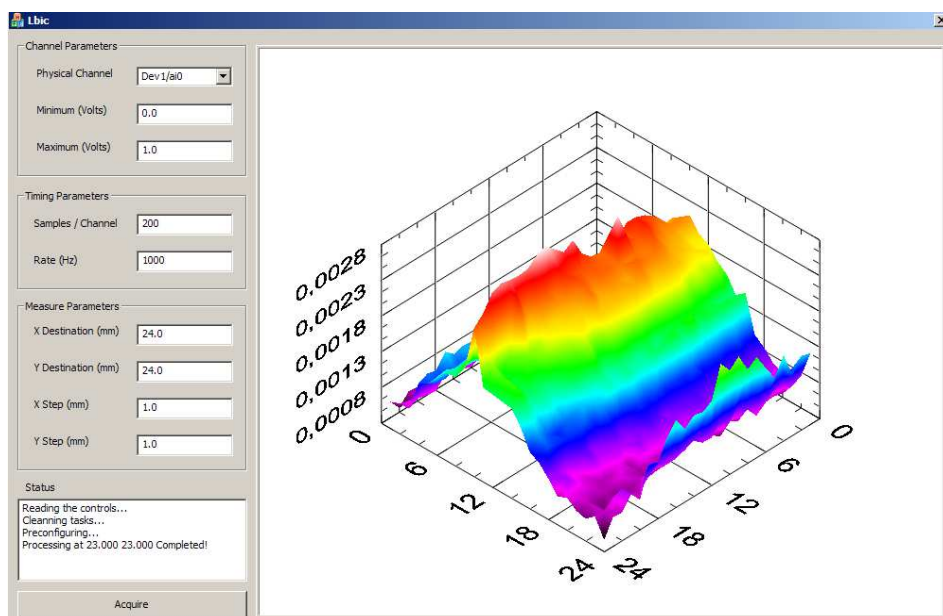
Moduł liniowy MLA-K stanowi kompletne urządzenie do realizacji przemieszczeń liniowych charakteryzujące się prostą konstrukcją i dokładnością ( $1\ \mu\text{m}$ ). Oprócz prostej konstrukcji i dokładności jego niewątpliwą zaletą jest kompatybilność z systemami połączeń aluminiowych. Moduł MLA-K wyposażony jest w silnik krokowy 2-fazowy 60BYGH603 firmy WOBIT charakteryzujący się napięciem zasilania  $5\ \text{V}$  i poborem prądu wynoszącym  $2.5\ \text{A}$ . Do sterowania modułu wykorzystano programowalny sterownik silników krokowych z budowanym indekserem SIC-184. Sterownik jest zasilany napięciem stałym  $12\ \text{V}$ – $36\ \text{V}$  i charakteryzuje się zintegrowanym poborem mocy do  $4\ \text{A}$ . Dany sterownik posiada możliwość płynnej regulacji prądu silnika i redukcji prądu w przypadku bezczynności, możliwość współpracy z dowolnym enkoderem inkrementalnym i posiada programowalny generator trajektorii ruchu. Komunikacja ze sterownikiem jest zrealizowana z wykorzystaniem interfejsu RS485 MODBUS-RTU. Do konfiguracji, programowania i diagnozowania sterownika wykorzystano interfejs USB. Do sterowania pracą sterownika wykorzystano program w języku C++ komunikujący się ze sterownikiem SIC 184 poprzez interfejs RS-485 z wykorzystaniem protokołu komunikacyjnego MODBUS-RTU. Do sprzęgnięcia komputera osobistego wyposażonego w port USB z interfejsem RS-485 wykorzystano uniwersalny konwerter USB  $\longleftrightarrow$  RS-485 z separacją galwaniczną AVTMOD14.

Wartości punktowych napięć z fotoogniwa odczytywano za pomocą 16 bitowej karty (charakteryzującej się częstotliwością próbkowania  $1.25\ \text{MS/s}$ ) przetworników analogowo-cyfrowych NI USB-6255 firmy National Instruments. Sygnał doprowadzany do karty był za pomocą modułu NI BNC-2120. Omawiana karta przetworników wraz z modulem BNC została przedstawiona na rysunku 4.



**Rys. 4.** Karta pomiarowa NI USB-6255 wraz z modulem NI BNC-2120

Procesem pomiarowym zarządza aplikacja pracująca na komputerze osobistym. Algorytmy akwizycyjne i sterujące zostały zaimplementowane w języku programowania obiektowego C++. Projekt i kompilacja kodu zostały zrealizowane przy pomocy zintegrowanego środowiska programistycznego Microsoft Visual Studio 2008®. Interfejsy użytkownika aplikacji zostały zaimplementowane z wykorzystaniem biblioteki MFC (ang. *Microsoft Foundation Class*) oraz bibliotek i komponentów dostarczanych przez firmę National Instruments. Na kolejnym rysunku został przedstawiony panel aplikacji do badań wydajności ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu.

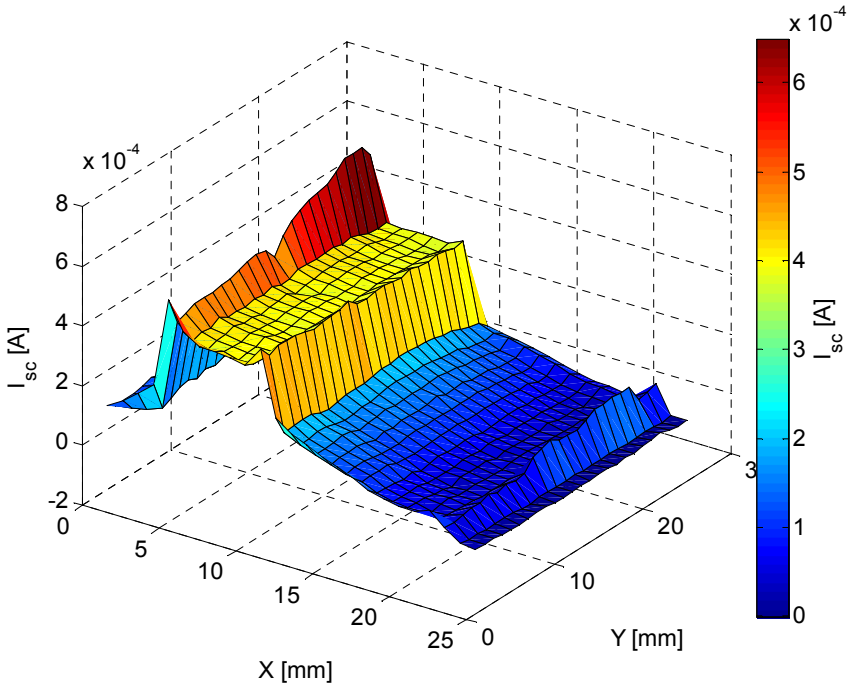


**Rys. 5.** Panel aplikacji do badań wydajności ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu

W pierwszym kroku użytkownik ustala, do którego wejścia modułu BNC został doprowadzony sygnał z ogniwa fotowoltaicznego. Kolejne ustawienia dotyczą ilości próbek, z których zostanie uśredniona wartość fotoprądu oraz częstotliwości próbkowania. Ostatnim krokiem przed uruchomieniem procesu pomiarowego jest zadanie pozycji końcowych XY oraz skoku. Podczas zbierania danych w czasie rzeczywistym kreślona jest trójwymiarowa mapa fotoprądu. Proces pomiarowy kończy się zapisem zebranych danych do pliku.

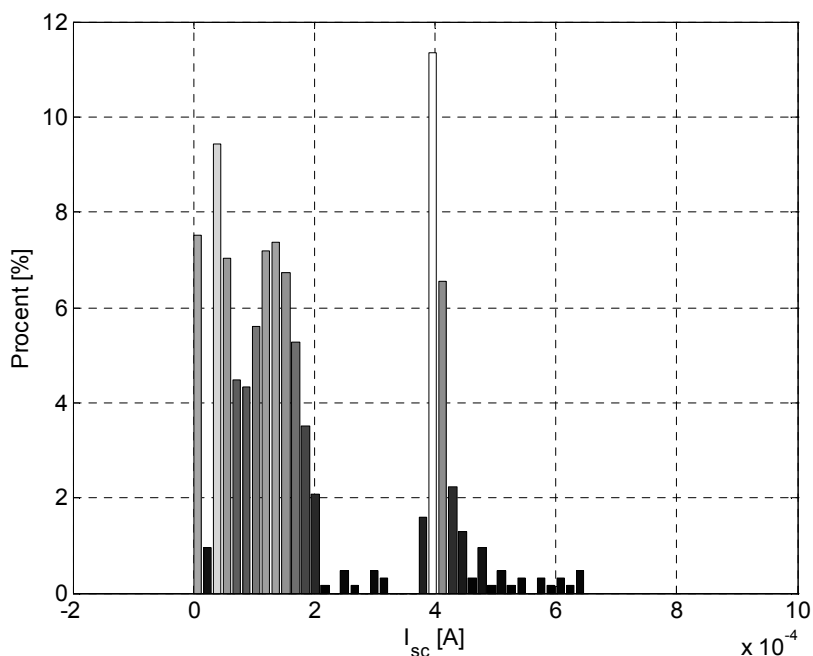
## Badania

W rozdziale tym przedstawione są przykładowe wyniki badań wydajności prądowej ogniw fotowoltaicznych uzyskane na zrealizowanym stanowisku badawczym. Obiektem przykładowych badań było ogniwo fotowoltaiczne o rozmiarach 24 mm x 24 mm. Pomiary odbyły się ze skokiem co 1 mm zarówno w osi X jak i Y. Mapa powierzchniowa rozkładu prądu zwarciovego  $I_{sc}$  uzyskanego dla badanego ogniwa fotowoltaicznego została przedstawiona na rysunku 6.



**Rys. 6.** Mapa powierzchniowa rozkładu prądu zwarciovego uzyskana dla przykładowego ogniwa fotowoltaicznego o wymiarach 24 mm x 24 mm

Na kolejnym rysunku przedstawiono histogram rozkładu prądu zwarciovego uzyskany dla zbadanego ogniwa. Histogram powstał na podstawie tych samych danych, które zostały przedstawione na rysunku powyżej.



Rys. 7. Histogram rozkładu prądu zwarcowego uzyskany dla badanego ogniwa fotowoltaicznego

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników jasno można stwierdzić, że w badanym ogniwie pracuje wydajnie jedynie jeden z czterech sektorów. Pozostałe sektory nie dają istotnego wkładu do całkowitej mocy ogniwa.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono szczegóły realizacji stanowiska badawczego do badań wydajności prądowej ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem metody punktowego indukowania prądu. Omówiono szczegółowo każdy blok będący częścią stanowiska. Przedstawiono aplikację, w której zaimplementowano algorytmy sterujące i akwizycyjne. Na zrealizowanym stanowisku zbadano przykładowe ogniwo fotowoltaiczne. Przedstawiono wyniki pomiarów w postaci mapy prądu zwarcowego uzyskanej dla badanego ogniwa słonecznego. Jak wykazały przeprowadzone badania technika ta umożliwiła detekcję niejednorodności, jak i detekcję całych sektorów ogniwa, które nie dają wkładu do wydajności prądowej ogniwa.

## Literatura

1. C.R. Osterwald, "Standards, calibration and testing of PV modules and solar cells" (eds T. Markvart and L. Castaner), Practical Handbook of Photovoltaics, Elsevier, Kidlington Oxford, 2003, 793.
2. K. Emery, "Measurement and characterization of solar cells and modules" (eds A. Luque and S. Hegedus), Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2003, 701.
3. H. Hoppe, J. Bachmann, B. Muhsin, K.-H. Drüe, I. Riedel, G. Gobsch, C. Buerhop-Lutz, Ch. J. Brabec and V. Dyakonov, "Quality control of polymer solar modules by lock-in thermography", J. Appl. Phys. 107 (2010), 014505.
4. J. Bachmann, C. Buerhop-Lutz, C. Deibel, I. Riedel, H. Hoppe, C. J. Brabec, V. Dyakonov, "Organic solar cells characterized by dark lock-in thermography", Sol. Energy Mater. Sol. Cells 94 (2010), 642.
5. P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schäffer, W. Warta, and S. W. Glunz, "Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images", J. Appl. Phys. 101 (2007), 123110.
6. J.A. Giesecke, M. Kasemann and W. Warta, "Determination of local minority carrier diffusion lengths in crystalline silicon from luminescence images", J. Appl. Phys. 106 (2009), 014907.
7. Ł. Chrobak, M. Maliński, „Zastosowanie zjawiska modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych do nieniszczących badań materiałów półprzewodnikowych”, Elektronika - technologie, konstrukcje, zastosowania LIII (12) (2012), 110-113.
8. Ł. Chrobak, M. Maliński, „Badania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki MFCA opartej na zjawisku modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki 3 (2011), WPK, 39-47.
9. E. I. Cole, "Beam-Based Defect Localization Methods", Microelectronics Failure Analysis (Materials Park: ASM International), 2004, ISBN 0-87170-804-3.
10. J. D. Zook, R. B. Macioliik, and J. D. Heaps, "Effects of Grain Boundaries in Polycrystalline Solar Cells" Appl Phys. Lett. 37 (1980), 223-226.
11. C. V. Hari Rao, H. E. Bates, and K.V. Ravi, "Electrical Effects of SiC Inclusions in EFG Silicon Ribbon Solar Cells", J. Appl. Phys. 47 (1976), 2614-2620.
12. C. Belouet, J. Hervo, R. Matres, N. T. Phuoc, and M. Pertus, "Growth and Characterization of Polysilicon Layers Achieved by the Ribbon-Against-Drop Process", Proc. 13th IEEE Photovoltaics Specialists Conf. 1978, 131-136.



13. W. D. Sawyer, "An Improved Method of Light-Beam-Induced Current Characterization of Grain Boundaries" *J. Appl. Phys.* 59 (1986), 2361-2368.
14. S. A. Galloway, A. W. Brinkman, K. Durose, P. R. Wilshaw, and A. J. Holland, "A Study of the Effects of Post-Deposition Treatment on CdS/CdTe Thin-Film Solar Cells Using High-Resolution OBIC," *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996), 3725-3727.

## **Streszczenie**

W pracy przedstawiono zbudowane stanowisko badawcze do badań ogniw słonecznych z wykorzystaniem techniki punktowego indukowania prądu wiązką laserową LBIC. Omówiono szczegółowo poszczególne bloki wchodzące w skład kompletnego stanowiska badawczego. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki, w postaci mapy powierzchniowego rozkładu prądu zwarciovego, uzyskane dla przykładowego ogniwa fotowoltaicznego.

## **Abstract**

This paper presents the realized experimental set-up for the investigations of solar cells with the use of the laser beam induced current method. Individual blocks as parts of a complete experimental set-up have been described in detail. Experimental data in the form of the short circuit current surface map, obtained for an example solar cell, have been presented and discussed.

**Keywords:** silicon, photovoltaics, solar cells, cells mapping, current efficiency