

Konstanty MARSZAŁEK, Katarzyna DYNDAŁ, Gabriela LEWIŃSKA

Centrum Fotowoltaiki AGH jako element systemu wspierającego rozwój odnawialnych źródeł energii

Abstrakt: Gwałtowny rozwój fotowoltaiki i innych odnawialnych źródeł energii spowodował wzrost popytu na prace badawcze i rozwojowe w tych obszarach oraz zapotrzebowania na kadry inżynierskie o takim profilu. Szereg uczelni, w tym Akademia Górniczo-Hutnicza, uruchomiło nowe kierunki studiów lub nowe specjalizacje związane z obszarem odnawialnych źródeł. Przykładem takiej działalności było powołanie przez Senat AGH Centrum Fotowoltaiki. Prezentowany artykuł opisuje powstałe w Centrum laboratoria oraz ich możliwości badawcze i pomiarowe.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, laboratoria terenowe i stacjonarne

Działalność badawcza i dydaktyczna

Akademia Górniczo-Hutnicza intensywnie włączyła się w nurt rozwoju odnawialnych źródeł energii. Na wielu wydziałach kierunki kształcenia związane z energetyką profilowane są pod tym kątem, a także powstają kolejne – związane konkretnie z OZE. Jednym z działań w tym obszarze było powołanie Centrum Fotowoltaiki (CF), które po kilku latach rozbudowy bazy aparaturowej i kadrowej zostało włączone do Centrum Technologii Kosmicznych. Naturalnym powodem tej fuzji jest fakt zastosowania fotowoltaiki we wszystkich misjach kosmicznych. Nie bez znaczenia było także przygotowanie merytoryczne i aparaturowe CF. Pracownicy Centrum są jednocześnie zatrudnieni w Instytucie Elektroniki Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji. Oprócz prac badawczych prowadzą działalność dydaktyczną w zakresie odnawialnych źródeł energii, w szczególności fotowoltaiki, na kilku wydziałach oraz w ramach Szkoły Doktorskiej. Efektem tych działań są obronione prace dyplomowe: kilkadziesiąt inżynierskich, kilkanaście magisterskich, a także doktorat na temat ogniw

cienkowarstwowych przeznaczonych do aplikacji kosmicznych. We wszystkich tych rozprawach kładziono nacisk na praktyczne i projektowe aspekty zastosowań odnawialnych źródeł, a opisywane w nich badania były często prowadzone w kooperacji z podmiotami przemysłowymi. W ramach tej działalności zespół w składzie K. Marszałek, K. Dyndał i G. Lewińska przygotował podręcznik pt. *Fotowoltaika (Photovoltaics)* – w polskiej i angielskiej wersji językowej, który jest dostępny w zasobach internetowych Centrum e-Learningu AGH.

Prace badawcze w laboratoriach

Kolejnym aspektem działalności Centrum jest rozwijanie podległych mu laboratoriów i prowadzenie w nich prac badawczych. Infrastruktura obejmuje dwa laboratoria stacjonarne znajdujące się w obrębie kampusu AGH w Krakowie oraz laboratorium terenowe na terenie Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii WGGiOŚ AGH w Miękinii.

Laboratorium fotowoltaiczne wykonuje pomiary i dokonuje analiz pracy modułów w rzeczywistych warunkach pogodowych dzięki naziemnej instalacji fotowoltaicznej (złożonej z jedenastu niezależnych torów pomiarowych) oraz instalacji nadążnej, które zostały przedstawione na Rys. 1.

Odczyt, wizualizacja i rejestracja danych odbywają się w trybie ciągłym za pomocą programu mLog złożonego z trzech modułów: mLog Server, mLog Client oraz mLog View. Informacji o aktualnej sytuacji pogodowej dostarcza przenośna stacja meteorologiczna

zaprojektowana i wykonana przez Zakład Elektroniki i Automatyki Przemysłowej A-STER, którą przedstawiono na Rys. 2. Stacja umożliwi pomiar kierunku i prędkości wiatru, temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza oraz napromieniowania słonecznego.

Na wyposażenie laboratorium składają się także panele fotowoltaiczne, m.in. monokrystaliczne, polikrystaliczne, mikromorficzne, cienkowarstwowe (CdTe, CIGS), takich firm jak: Trunsun Solar, Solar Frontier,

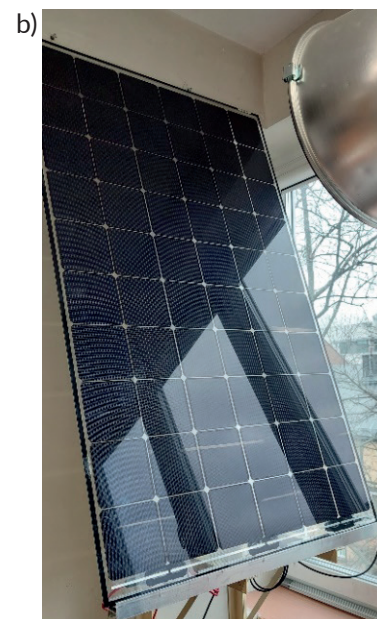
German Solar, Hanplast Solar, Sontor, Advanced Solar Power ASP, TSMC Solar. Oprócz tradycyjnych paneli zbudowanych z ogniw o standardowych wymiarach, na wyposażeniu laboratorium znajdują się także najnowocześniejsze panele wykonane z ogniw połówkowych technologią SmartWire oraz panele dwustronne wykonane technologią Bifacial. Wybrane panele fotowoltaiczne, dla których wykonywane są badania w laboratorium, zostały przedstawione na Rys. 3.



Rys. 1. Instalacje fotowoltaiczne w laboratorium terenowym: a) instalacja naziemna składająca się z jedenastu niezależnych torów pomiarowych; b) instalacja nadążna zlokalizowana w terenowym laboratorium fotowoltaicznym na terenie Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii WGGiOŚ AGH w Miękinii



Rys. 2. Przenośna stacja meteorologiczna firmy A-STER znajdująca się w terenowym laboratorium fotowoltaicznym w Miękinii

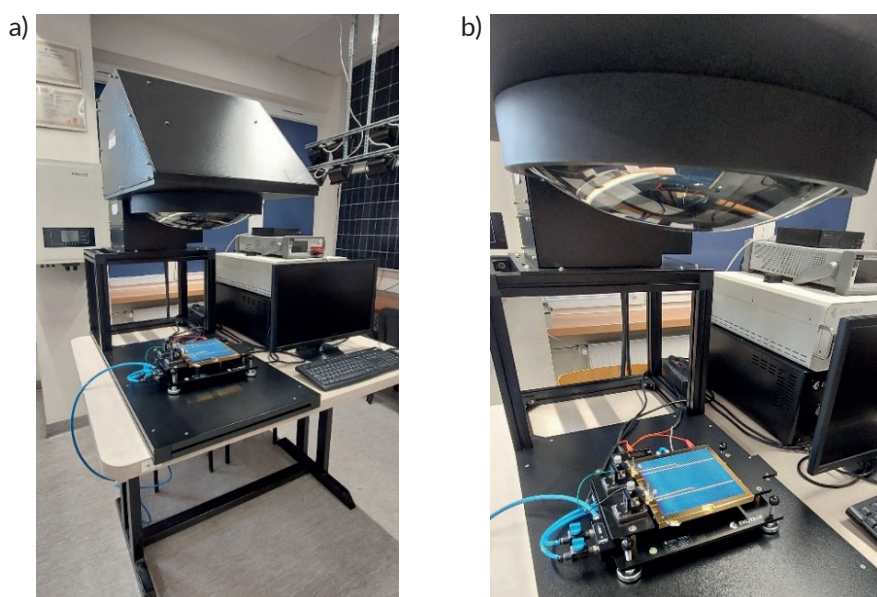


Rys. 3. Panele fotowoltaiczne wykonane technologiami: a) SmartWire; b) Bifacial, będące częścią wyposażenia stacjonarnego laboratorium fotowoltaicznego AGH w Miękinii

Laboratorium wykonuje kompletne pomiary parametrów pracy paneli fotowoltaicznych za pomocą wysokiej klasy wielofunkcyjnego miernika MI 3108 Eurotest PV łączącego funkcje miernika parametrów instalacji elektrycznych i testera instalacji fotowoltaicznych. Przyrząd umożliwia m.in. tworzenie charakterystyk prądowo-napięciowych, przeliczanie zmierzonych parametrów do wartości STC (*Standard Test Condition* – standardowe warunki testowania) oraz pomiar mocy po stronach AC i DC falownika/inwertera. Laboratorium wyposażone jest także w profesjonalną kamerę termowizyjną FLIR C5 pozwalającą zidentyfikować np. przegrzewające się miejsca ogniw (tzw. hotspoty), a także luksomierz Voltcraft LX 1108 umożliwiający pomiar natężenia promieniowania słonecznego.

Najważniejszym elementem laboratorium jest symulator promieniowania słonecznego SS-X200R klasy AAA, wyprodukowany przez firmę Enlitech, który został przedstawiony na Rys. 4. Urządzenie przeznaczone jest do badań ogniw fotowoltaicznych, m.in. monokrystalicznych, polikrystalicznych i perowskitowych, jak również cienkowarstwowych (np. CIGS, CdTe). Wyposażenie symulatora stanowi lampa Xe o mocy 1600 W i filtry dające widmo promieniowania AM1,5G i AM0 od 350 nm do 1450 nm (zgodne z normą ASTM E927).

Wyposażenie symulatora słonecznego daje możliwość przeprowadzania specjalistycznych badań ogniw fotowoltaicznych w warunkach kosmicznych, czyli w obecności promieniowania kosmicznego, tzn. w jego części falowej o widmie AM0. Stanowisko jest również wyposażone w jednostkę źródłowo-pomiarową serii B2901A firmy Keysight Technologies, umożliwiającą precyzyjny pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych $I(U)$. Parametry techniczne symulatora charakteryzują się szerokim zakresem napięć (od -210 V do $+210\text{ V}$) i prądów (od -3 A DC do $+3\text{ A DC}$ i od $-10,5\text{ A}$ do $+10,5\text{ A}$ impulsowy) oraz doskonałą rozdzielczością pomiarową (100 fA i 100 nV) i źródłową (1 pA i $1\text{ }\mu\text{V}$). Symulator słoneczny umożliwia pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych $I(U)$ dla ogniw fotowoltaicznych o maksymalnym wymiarze $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$. Dzięki pomiarom możliwe jest wyznaczenie najważniejszych parametrów ogniw PV, takich jak: prąd zwarcia (I_{sc}), prąd, przy którym można pobrać maksymalną moc z ogniwa fotowoltaicznego (I_{pm}), napięcie obwodu otwartego (V_{oc}), napięcie, przy którym można pobrać maksymalną moc z ogniwa fotowoltaicznego (V_{pm}), sprawność ogniwa PV (η) oraz współczynnik wypełnienia (*fill factor*, FF).



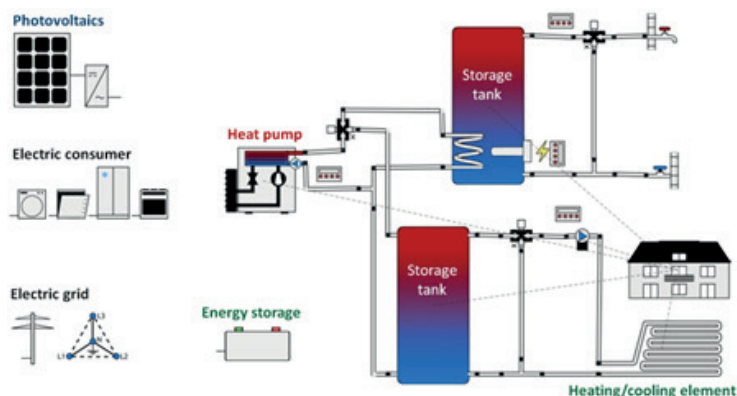
Rys. 4. Symulator promieniowania słonecznego SS-X200R klasy AAA firmy Enlitech będący na wyposażeniu laboratorium fotowoltaicznego AGH: a) widok ogólny; b) symulator wraz z widokiem na stolik pomiarowy z ogniwem fotowoltaicznym

Laboratorium fotowoltaiczne prowadzi również działalność projektową w zakresie systemów energetycznych i ciepłych (instalacje fotowoltaiczne, pompy ciepła, magazyny energii) oraz systemów hybrydowych. Narzędziem do projektowania systemów OZE są dwa specjalistyczne programy: PV*SOL firmy Valentin Software GmbH (10 licencji) oraz Polysun firmy Vela Solaris (10 licencji typu floating), które są wykorzystywane przez projektantów i instalatorów na całym świecie. Program Polysun jest zainstalowany na serwerze sieciowym, co sprawia, że możliwy jest zdalny dostęp do oprogramowania. Przykładowy projekt hybrydowego systemu energetycznego, składającego się z instalacji fotowoltaicznej, pompy ciepła i zasobnika energii, wykonany w programie Polysun, został przedstawiony na Rys. 5.

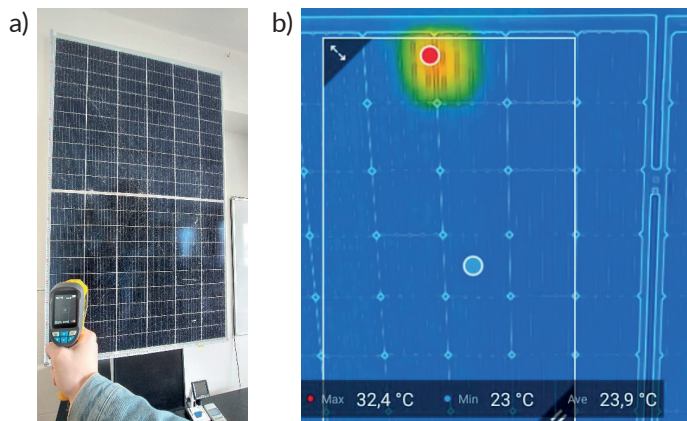
W laboratorium fotowoltaicznym realizowane są prace dyplomowe (inżynierskie, magisterskie i doktorskie)

oraz zajęcia dydaktyczne dla studentów i doktorantów z różnych wydziałów AGH, m.in. z Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, a także ze Szkoły Doktorskiej.

Laboratorium fotowoltaiczne prowadzi **działalność naukowo-badawczą** dotyczącą OZE, czego wynikiem są artykuły opublikowane w recenzowanych czasopismach o zasięgu krajowym oraz zagranicznym. Jednostka jest także zaangażowana w **badania naukowe** oraz **prace badawcze dla przemysłu**. Obecnie laboratorium współpracuje z firmą PZL Sędziszów, która zajmuje się produkcją nowoczesnych paneli fotowoltaicznych dla marki Avia Solar. Aktualna współpraca dotyczy analizy stanu technicznego ogniw fotowoltaicznych za pomocą elektroluminescencji oraz badań uszkodzeń paneli fotowoltaicznych za pomocą podczerwieni (Rys. 6), a także wyznaczania parametrów elektrycznych ogniw PV.



Rys. 5. Model hybrydowego systemu energetycznego składającego się z modułów fotowoltaicznych, magazynu energii i pompy ciepła zastosowany do symulacji przy użyciu VelaSolaris Polysun



Rys. 6. Stanowisko do pomiaru uszkodzeń ogniw fotowoltaicznych za pomocą kamery termowizyjnej: a) panel smart wire z kamerą termowizyjną; b) zdjęcie panelu wykonane w podczerwieni z zaznaczonym przegrzewającym się miejscem (czerwony punkt)

Działalność pracowni optycznej

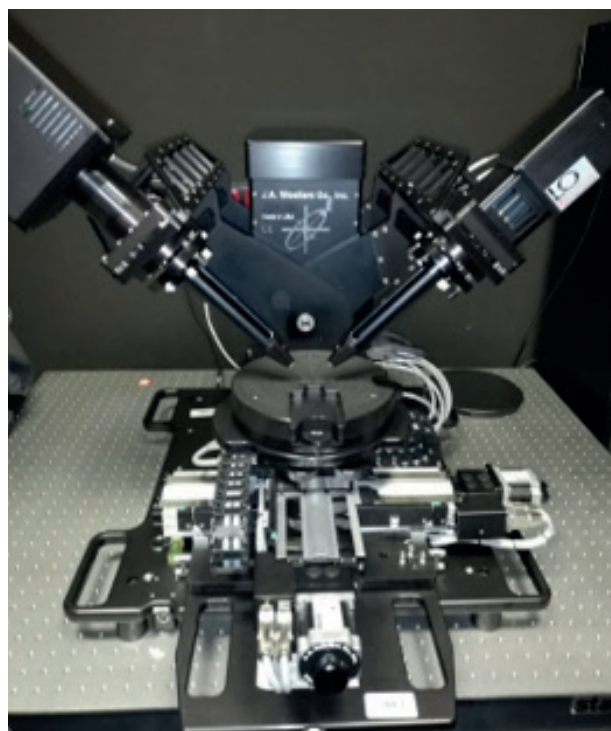
Centrum prowadzi ponadto badania w **pracowni optycznej**. Koncentrują się one wokół konstrukcji elektronicznych urządzeń optoelektronicznych (cienkowarstwowych i polimerowych ogniw fotowoltaicznych, organicznych diod luminescencyjnych, sensorów) i badań nad nimi.

Podstawowymi urządzeniami badawczymi wykorzystywanymi w pracowni są spektrofotometr światłowodowy Avantes Sensline Ava-Spec ULS-RS-TEC (CCD 2048×64 pikseli) wraz z lampą Avantes AvaLight DH-S-BAL-Hal, z dodatkowym sprzętem (kule całkujące, wzorzec bieli, filtry), oraz elipsometr spektroskopowy Wollam 2000 (Rys. 7).

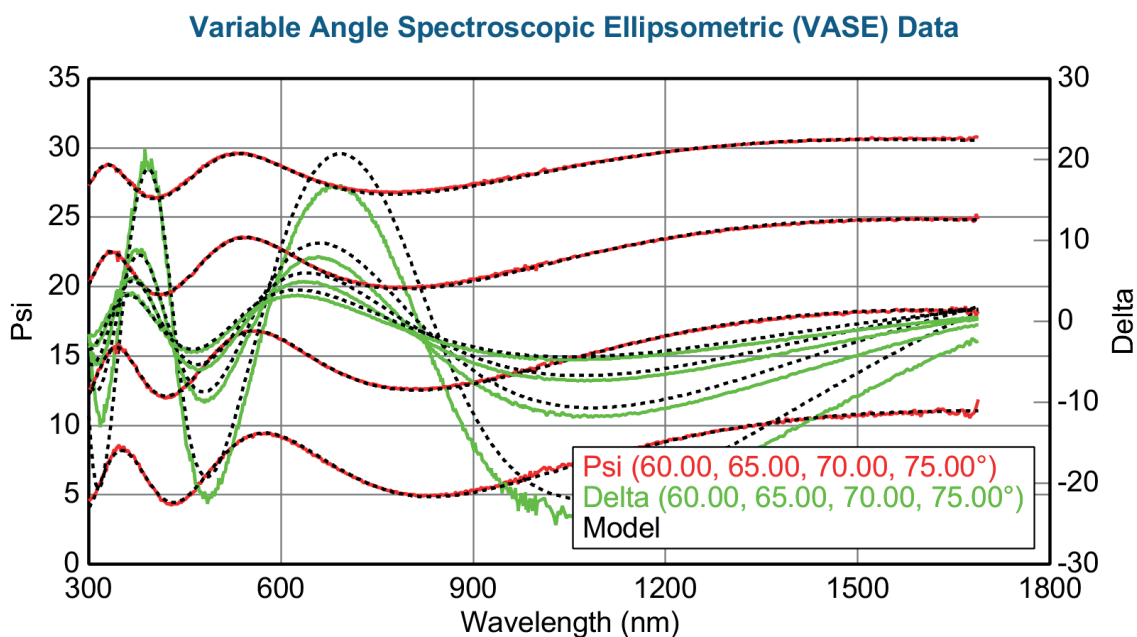
Na Rys. 8 przedstawiono wyniki pomiarów elipsometrycznych w funkcji długości fali (linia ciągła) oraz z dopasowaniem modelu fizycznego (linia przerywana).

Układ pomiarowy jest przeznaczony do badań zarówno materiałów, jak i wykonanych z nich cienkich warstw oraz układów cienkich warstw. Dzięki dużej czułości i modyfikowalnemu układowi optycznemu za jego pomocą można przeprowadzić badania materiałów organicznych i nieorganicznych stosowanych

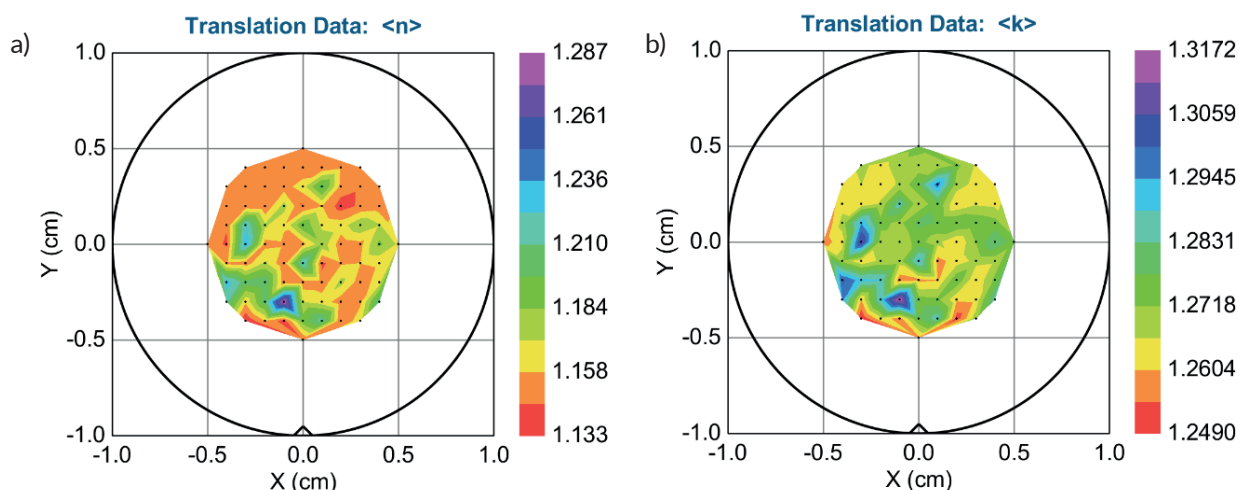
w sensorach (diodach luminescencyjnych, ogniwach fotowoltaicznych, tranzystorach oraz pamięciach), a także całych urządzeń. W materiałach obserwowane są znaczne zmiany współczynników ekstynkcji i załamania w funkcji temperatury, w zakresie bliskiej podczerwieni (Rys. 9).



Rys. 7. Elipsometr spektroskopowy Wollam 2000



Rys. 8. Kąty elipsometryczne w funkcji długości fali wraz z dopasowaniem bazującym na modelu Cauchy'ego dla warstw krzemionkowych

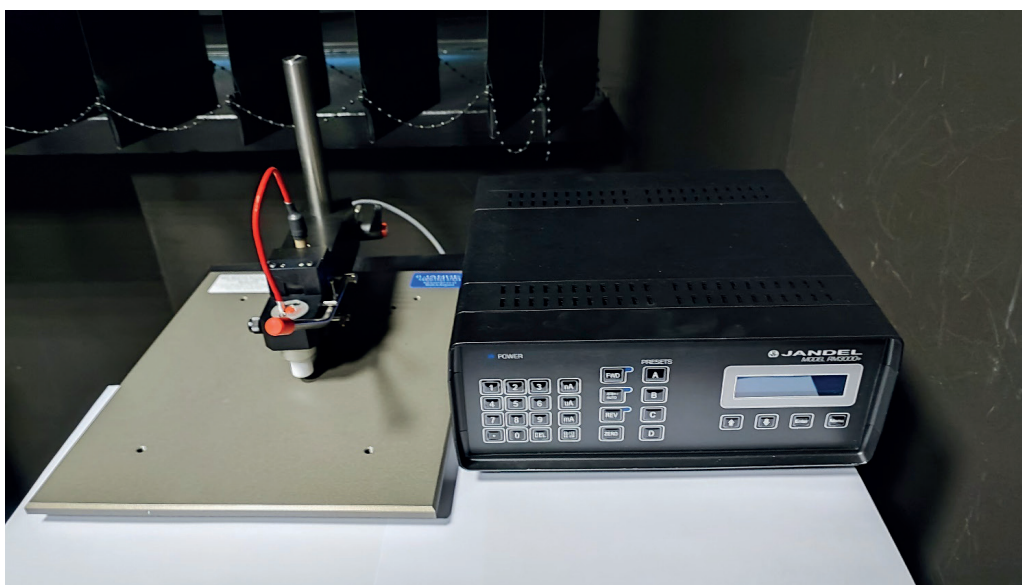


Rys. 9. Mapy: a) współczynnika załamania i b) współczynnika ekstynkcji dla warstw AZO

Do przeprowadzenia pomiarów przewodnictwa elektrycznego warstw do zastosowań w fotoogniwach używany jest miernik oporności powierzchniowej firmy Materials Development Corp, zakupiony w 2023 r. (Rys. 10). Wykorzystuje on metodę czteropunktowego pomiaru oporności. Na zestaw pomiarowy składa się miernik Resistivity Test Unit RM3000 (pomiar z zakresu od 10 nA do 100 mA, napięcie zgodności od 0 V do 50 V) oraz próbnik Multi-Height Microposition Probe. Do kalibracji urządzenia używana jest próbka referencyjna na bazie tlenku indowocynowego. Zakres pomiarowy miernika wynosi

od $1 \Omega/\square$ do $10 \Omega/\square$. Układ jest sterowany za pomocą komputerowego oprogramowania do obsługi i kontroli danych (pamięć urządzenia: co najmniej 50 pomiarów).

Miernik ma możliwość pomiaru napięcia o wartości od 0,01 mV do 1250 mV, jego dokładność wynosi 0,5% w całym zakresie, a 0,2% w średnim zakresie pomiarowym. Obecnie prowadzone są badania rezystywności dla warstw zbudowanych z domieszkowanych materiałów tlenkowych CuO i Cu₂O (jako warstw absorbera ogniwa), ZnO i WO₃ (jako warstw emitera), a także ZnO:Al (jako elektrody transparentnej w cienkowarstwowym ogniwie słonecznym).



Rys. 10. Miernik oporności powierzchniowej

Poniżej przedstawiono listę publikacji z ostatnich kilku lat powstałych w ramach prac prowadzonych w Centrum Fotowoltaiki. Zaprezentowane w artykule aspekty działania Centrum wpisują się w tematykę rozwoju odnawialnych źródeł energii czy energetyki rozproszonej, jak również w zakres projektu Europejskiego Uniwersytetu Kosmicznego, którego AGH jest współrealizatorem.

Lista publikacji pracowników Centrum Fotowoltaiki AGH:

- Dyndał K., Sanetra J., Marszałek K.W. (2021), *Study of the Second-generation of CdTe and CIGS Thin Film PV Modules Under Natural Sunlight Conditions*, „Renewable Energy and Power Quality Journal” 19: 379–384.
- Dyndał K., Marszałek K.W., Kąkol Z. (2022), *Design of Complex Energy Systems (Thin Film Photovoltaics, Collectors, Heat Pumps and Energy Storage)*, „Przegląd Elektrotechniczny” 98 (9): 243–246.
- Iwanek S., Sanetra J., Marszałek K.W. (2022), *Optical Method for Homogeneity Testing of thin Films Electrodes for Photovoltaic Cells*, „Przegląd Elektrotechniczny” 98 (9): 239–242.
- Lewińska G., Danel K.S., Wiśła-Świder A., Usatenko Z., Kanak J., Walczak Ł., Kuterba P., Sanetra J., Marszałek K.W. (2020), *Photoelectrical Properties and Surface Examination of Luminescent Copolymer Compounds*, „Applied Surface Science” 533 (15): 147366.
- Lewińska G., Khachatryan K., Danel K.S., Danel Z., Sanetra J., Marszałek K.W. (2020), *Investigations of the Optical and Thermal Properties of the Pyrazoloquinoline Derivatives and Their Application for OLED Design*, „Polymers” 12 (11): 2707.
- Lewińska G., Dyndał K., Sanetra J., Marszałek K.W. (2021), *Micro-morph and Polymorphous Solar Panel in a Warm Temperature Transitional Climate – Comparison of Outdoor Performance and Simulations*, „Renewable Energy and Power Quality Journal” 19: 385–390.
- Lewińska G., Jelen P., Kanak J., Walczak Ł., Socha R., Sitarz M., Sanetra J., Marszałek K.W. (2021), *Investigation of Dye Dopant Influence on Electrooptical and Morphology Properties of Polymeric Acceptor Matrix Dedicated for Ternary Organic Solar Cells*, „Polymers” 13 (23): 4099.
- Lewińska G., Sosna D., Kanak J., Danel K.S., Sanetra J., Sahraoui B., Marszałek K.W. (2022), *The Role of Small Molecules and Quantum Dots Doping on the Morphology of Layers for Potential Applications in Ternary Solar Cells*, „Optical Materials” 134: 113056.
- Marszałek K.W., Dyndał K., Lewińska G. (2021), *Fotowoltaika*, <https://epodreczniki.open.agh.edu.pl/handbook/35> [dostęp: 17.04.2023].
- Marszałek K.W., Dyndał K., Lewińska G., Sanetra J. (2021), *Photovoltaics*, <https://epodreczniki.open.agh.edu.pl/handbook/1175> [dostęp: 17.04.2023].
- Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M. (2022), *Modification of Semiconducting Copper Oxide Thin Films Using Ion Implantation*, „Przegląd Elektrotechniczny” 98 (9): 255–258.

Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M., Jelen P., Perzanowski M., Jelen P., Marszałek M., Sitarz M. (2022), *Influence of Cr Ion Implantation on Physical Properties of CuO Thin Films*, „International Journal of Molecular Sciences” 23 (9): 4541.

Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M., Jelen P., Perzanowski M., Marszałek M., Sitarz M. (2022), *Cuprous Oxide Thin Films Implanted with Chromium Ions – Optical and Physical Properties Studies*, „International Journal of Molecular Sciences” 23 (15): 8358.

AGH Photovoltaics Centre as part of a system supporting the development of renewable energy sources

Abstract: The rapid development of photovoltaics and other renewable energy sources has increased the demand for research and development work in these areas and the need for engineering personnel with such a profile. A number of Universities including AGH have launched new majors or new specializations related to the area of renewable sources. One such was the establishment of the Photovoltaics Center by the AGH Senate. The paper presented here describes the laboratories established at the center and their research and measurement capabilities.

Keywords: photovoltaics, stationary laboratory, field laboratory

Dr hab. inż. Konstanty Marszałek, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Informatyki, Elektroniki
i Telekomunikacji
marszale@agh.edu.pl



Dr inż. Katarzyna Dyndał

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Informatyki, Elektroniki
i Telekomunikacji



Dr inż. Gabriela Lewińska

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Informatyki, Elektroniki
i Telekomunikacji

