

Europejski projekt metrologiczny NanoWires wspierający rozwój nanotechnologii dla przemysłu energii odnawialnej

European metrology project NanoWires supporting the development of nanotechnologies for the renewable energy industry

Janusz D. Fidelus
Główny Urząd Miar

Teodor Gotszalk
Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono założenia i szczegółowe cele projektu oraz aktualny stan wiedzy i możliwości uzyskania postępu w zapewnieniu spójności pomiarowej w europejskim i światowym przemyśle, w zakresie poprawy wydajności i jakości urządzeń do pozyskiwania energii z nanoprzewodów. Omówiono zakres współpracy Głównego Urzędu Miar z Politechniką Wrocławską w tematyce metrologii pojedynczych nanowłókien, służących do pozyskiwania energii oraz potencjalny wpływ założonych w projekcie przedsięwzięć na środowisko, metrologię i użytkowników.

The article presents the assumptions and detailed objectives of the project as well as the current state of the art and the possibilities of achieving progress in ensuring traceability in European and global industry in the field of improving the efficiency and quality of devices for energy harvesting from nanowires. The scope of cooperation between the Central Office of Measures and the Wrocław University of Technology in the field of metrology of individual nanofibers used for energy harvesting was discussed. The potential impact of the design assumptions on the environment, metrology and users were also discussed.

Słowa kluczowe: nanoprzewody, spójność pomiarowa, nanotechnologia, urządzenia na bazie nanoprzewodów do pozyskiwania energii, energia odnawialna, ogniwa słoneczne, szybkie obrazowanie termiczne, MEMS-SPM, SThM, FIB-SEM, AFM

Keywords: nanowires, measurement traceability, nanotechnology, nanowire energy harvesting devices, renewable energy, solar cells, fast thermal imaging, MEMS-SPM, SThM, FIB-SEM, AFM

Wstęp

Ograniczone zasoby energii, oparte na paliwach kopalnych i ich negatywny wpływ na środowisko, skłoniły państwa na całym świecie do podjęcia ogromnego wysiłku, zmierzającego do zapewnienia bardziej zrównoważonego zaopatrzenia w energię i jej zużycie. Pozyskiwanie energii (energy harvesting) ze źródeł odnawialnych, takich jak energia słoneczna, ciepło opadowe i ruch mechaniczny, jest postrzegane jako obiecujące rozwiązanie problemów energetycznych na świecie. Według prognoz opublikowanych przez MARKETSANDMARKETS rynek pozyskiwania energii wzrośnie z 311 mln USD w 2016 roku do 646 mln USD w 2023 roku. Obecnie około 1,7 % światowej energii elektrycznej pochodzi z ogniw słonecznych. Nieustannie prowadzone są badania nad rozwiązaniami materiałowymi, aby zwiększyć wydajność konwersji słonecznej energii fotowoltaicznej [1, 2].

W ciągu ostatnich dwóch dekad podjęto znaczne wysiłki w celu opracowania urządzeń do pozyskiwania energii, od makro- i mikroskali po nanoskale (micro and nanoenergy harvesters). Ze względu na ich ekstremalnie mały rozmiar fizyczny i wysoki stosunek powierzchni do objętości, systemy pozyskiwania energii oparte na nanoprzewodach NW (nanowires), w tym ogniwa fotowoltaiczne PV (photovoltaic), nanogeneratory energii termoelektrycznej i elektromechanicznej, spotkały się z ogromnym zainteresowaniem i osiągnęły obiecujący postęp. Przewiduje się, że wydajność ogniw słonecznych na bazie nanoprzewodów może być zwiększona za pomocą inżynierii nanofotonicznej z obecnych 17,8 % do ostatecznego limitu sięgającego 46,7 %.

Choć nowatorskie konstrukcje i zaawansowane technologicznie materiały, przeznaczone dla różnych urządzeń do pozyskiwania energii, rzeczywiście oferują wiele

potencjalnych korzyści, to jednak stanowią również nie małe wyzwania, związane z testowaniem i charakteryzacją. Na przykład brakuje powiązania ilościowego i korelacji między wydajnością pojedynczego nanoprzewodu, a wydajnością całego urządzenia. Ponadto brak jest obecnie wiarygodnej metrologii dla paneli nanoprzewodów o dużej powierzchni (od cm^2 do kilku m^2) o średnicach od 50 nm do 1 μm [3, 4]. Dlatego też kontrola jakości tych systemów pozyskiwania energii stanowi wyzwanie. Konieczne jest zastosowanie technik metrologicznych o dużej wydajności, które wymagają opracowania spójnych metod pomiarowych oraz modeli matematycznych, w celu scharakteryzowania indywidualnych nanoprzewodów do pozyskiwania energii, ogniw słonecznych i innych urządzeń.

Od września 2020 roku dwie instytucje z Polski, tj. Główny Urząd Miar (Pracownia Siły i Twardości oraz Pracownia Mikrofala, Pola Elektromagnetycznego i Kompatybilności Elektromagnetycznej) oraz Politechnika Wrocławska (Katedra Nanometrologii) rozpoczęły działania w zaawansowanym technologicznie, trzyletnim europejskim projekcie o akronimie NanoWires, zatytułowanym „Wysokowydajna metrologia dla urządzeń na bazie nanoprzewodów do pozyskiwania energii” (*High throughput metrology for nanowire energy harvesting devices*). Projekt ten jest finansowany z Europejskiego Programu na rzecz Innowacji i Badań w dziedzinie Metrologii (EMPIR), który ma na celu wspieranie rozwoju systemów odzyskiwania energii z nanourządzeń [3]. Współpracujące ze sobą zespoły z Polski wniosą swój wkład oraz wiedzę specjalistyczną w celu opracowania narzędzi i metod do zapewnienia spójności pomiarowej i charakteryzacji urządzeń do pozyskiwania energii, opartych na nanoprzewodach.

Nanotechnologia (nanotechnology) jest ciągle nową i prawdziwie rewolucyjną technologią XXI wieku, której istotą jest badanie, sterowane tworzenie i stosowanie materiałów i struktur, urządzeń i systemów o nanometrowych wymiarach. Wiąże się z nią duże nadzieje na uzyskanie znaczących korzyści w wielu dziedzinach życia społecznego wraz z poprawą diagnostyki medycznej i leczenia, pozyskaniem bardziej wydajnych źródeł energii, nowych materiałów (lżejszych, mocniejszych i tańszych), nowych produktów i urządzeń elektronicznych, a także z czystością środowiska i wód. Nanotechnologia została uznana przez Komisję Europejską za jedną z sześciu kluczowych technologii wspomagających KET (Key Enabling Technologies), o strategicznym znaczeniu dla konkurencyjności i dobrobytu Unii Europejskiej.

Nanoprzewody, nanodruły (nanowires, NW) – rodzaj stałej i wydłużonej nanostruktury o średnicy w zakresie nanometrów. Typowe nanoprzewody mogą być wykonane z metalu, polimeru lub materiałów półprzewodnikowych.

Pozyskiwanie energii (energy harvesting, EH) – pojęcie stosuje się do sytuacji, kiedy źródło potencjalnej energii jest dobrze opisane i regularne (np. energia słoneczna) [5]. Pojęcie to określa proces pozyskiwania energii z otoczenia, która to energia, po przetworzeniu na energię elektryczną, jest wykorzystywana do zasilania małych autonomicznych urządzeń i czujników. Źródłami potencjalnej energii są drgania mechaniczne, fale radiowe, światło słoneczne, ciepło, przepływy itp. Różne rodzaje energii mogą być przekonwertowane na energię elektryczną przy pomocy specjalnych układów konwersji, wykorzystujących wiele zjawisk fizycznych, jak na przykład zjawisko piezoelektryczne, zjawisko indukcji elektromagnetycznej, efekt Seebecka, zjawisko fotoelektryczne i inne.

Cele projektu

Ogólnym celem projektu jest określenie spójności pomiarowej i charakteryzacja urządzeń do pozyskiwania energii na bazie wertykalnych nanoprzewodów. Szczegółowe cele projektu obejmują [1, 2]:

- opracowanie metod spójności pomiarowej dla wysokowydajnej charakteryzacji nanowymiarowej urządzeń na bazie nanoprzewodów do zbierania energii, zawierających struktury o kształcie 3D (cylindryczny, pryzmatyczny, piramidalny) i chropowatości ściany bocznej,
- opracowanie metod spójności pomiarowej dla wysokowydajnej charakteryzacji nanoelektrycznej półprzewodnikowych ogniw słonecznych na bazie nanoprzewodów, z wykorzystaniem przewodzącej Mikroskopii Sił Atomowych AFM (Atomic Force Microscopy) dla charakterystyki prądowo-napięciowej w zakresie prądowym od 100 fA do 1 mA, Skaningowej Mikroskopii Mikrofalowej SMM (Scanning Microwave Microscopy) do pomiarów zmiany stężenia domieszki (od 10^{15} do 10^{20} atomów/ cm^3 , z błędem nie większym niż 10 %) oraz systemów mikroelektromechanicznych sprzężonych z Mikroskopem ze Skanującą Sondą MEMS-SPM (Microelectromechanical system based Scanning Probe Microscope), dla rozdzielczości bocznej mniejszej niż 50 nm,
- opracowanie i zatwierdzenie metod spójności pomiarowej i modeli pomiarowych dla wysokowydajnej nanomechanicznej charakteryzacji urządzeń opartych na nanoprzewodach oraz nanoprzewodowych elektromechanicznych urządzeniach do zbierania energii, biorąc pod uwagę lokalne zginanie i ściskanie nanoprzewodów, w tym opracowanie spójności pomiarowej dla systemów MEMS-SPM (rozdzielczość mniejsza niż 10 pm głębokości) dla szybkiego jednoczesnego nanomechanicznego i elektrycznego pomiaru półprzewodnikowych i polimerowych nanoprzewodów piezoelektrycznych,
- opracowanie i zwalidowanie technik spójności pomiarowej do charakteryzacji termoelektrycznej, opartych na szybkim obrazowaniu termicznym nanoprzewodów (przewodność cieplna poniżej $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

z niepewnością względną nie większą niż 10 %, przy różnych prędkościach skanowania i powierzchni końcówki kontaktu,

- wdrożenie technologii i infrastruktury pomiarowej, opracowanej w ramach projektu, poprzez łańcuchy spójności pomiarowej, organizacje opracowujące normy (IEC TC 113 i IEC TC 82) oraz użytkowników końcowych (producenci ogniw słonecznych i generatorów energii).

Cele te będą wymagały działań na dużą skalę, co zdecydowanie wykracza poza możliwości pojedynczych krajowych instytucji metrologicznych i instytutów desygnowanych. Aby zwiększyć wpływ badań na otoczenie, należy zaangażować odpowiednie społeczności użytkowników, takie jak przemysł, organy normalizacyjne i regulacyjne zarówno przed opracowaniem metodologii, jak i w jej trakcie.

Mikroskop Sił Atomowych (Atomic Force Microscope, AFM) – rodzaj mikroskopu ze skanującą sondą SPM (Scanning Probe Microscope) do badania właściwości powierzchni. Zasada działania opiera się na skanowaniu powierzchni próbki przy użyciu sondy, przy jednoczesnym pomiarze przemieszczenia wykonywanym za pomocą laserowego układu pomiarowego. Po wykryciu zmiany sygnału na fotodiodzie mikroskop zmienia położenie sondy za pomocą skanera piezoelektrycznego, który jednocześnie pozwala na przesuwanie się próbki względem sondy skanującej lub też sondy względem nieruchomej próbki, w zależności od konstrukcji mikroskopu. AFM umożliwia również wykonywanie testów wgłębień.

Skaningowy Mikroskop Mikrofalowy (Scanning Microwave Microscope, SMM) – przewodzący AFM połączony z wektorowym analizatorem sieci (VNA), w celu badania materiałów o częstotliwościach mikrofalowych w nanoskali.

Systemy mikroelektromechaniczne (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) – technologia, którą w najbardziej ogólnej postaci można zdefiniować, jako zminiaturyzowane elementy mechaniczne i elektromechaniczne (tj. urządzenia i konstrukcje), które są wytwarzane przy użyciu technik mikro wytwarzania, opracowanych w przemyśle półprzewodników.

Mikroskop z sondą skanującą (Scanning Probe Microscope, SPM) – urządzenie mikroskopii, które tworzy obrazy powierzchni za pomocą fizycznej sondy skanującej próbkę.

Wysokowydajna nanowymiarowa charakteryzacja nanoprzewodów pozyskujących energię

W projekcie, po raz pierwszy zostanie opracowany zestaw demonstracyjnych układów nanoprzewodów wykonanych z różnych materiałów (np. Si, ZnO i GaN), o średnicach poniżej 100 nm, kształcie cylindrycznym, stosunku długości do średnicy wynoszącym od 20 do 100 i chropowatości ściany bocznej w zakresie nanometrów.

Ponadto zostanie wykorzystana i dalej rozwijana nowa, wysokowydajna optyczna metoda pomiaru, tzw. skaterometria obrazowa, która umożliwia rejestrację serii obrazów oświetlonej próbki dla kilku długości fali. Opracowane zostaną niezawodne i o szerokim zastosowaniu metody, przydatne do charakteryzacji defektów, bazujące na metodach badawczych rozwijanych przez partnerów projektu oraz na zaawansowanym połączeniu z metodami mikroskopii o wysokiej rozdzielczości w hybrydowym podejściu metrologicznym. Powyższe metody będą doskonałym uzupełnieniem obecnych zaawansowanych metod obrazowania defektów w nanoobjektach, wykorzystujących m.in. transmisyjny mikroskop elektronowy TEM (Transmission Electron Microscope) [6].

Złożona geometria 3D układów nanoprzewodów, zaangażowane różne zaawansowane materiały, a także spory zestaw wymagań metrologicznych znacznie wykraczają poza najnowocześniejsze techniki badawcze. Wykorzystana w projekcie kombinacja zaawansowanej metrologii AFM i Skaningowej Mikroskopii Elektronowej SEM (Scanning Electron Microscopy), wraz z wyrafinowanymi narzędziami metrologii optycznej, stwarza wyjątkowe możliwości, aby sprostać temu wyzwaniu. Charakteryzacja geometrii i wielkości nanostruktur jest zatem możliwa lokalnie (np. AFM), jak również całościowo (tj. skaterometria i elipsometria matrycy Muellera MME).

Zostaną opracowane wydajne możliwości modelowania na bazie, np. Metody Elementów Skończonych FEM (Finite Element Method). Zatem, pod koniec niniejszego projektu, po raz pierwszy dostępna będzie metrologia HV do niezawodnego określania parametrów porządkowych dużych układów skoordynowanych nanosystemów, takich jak układy nanoprzewodów krzemowych.

Transmisyjny Mikroskop Elektronowy (Transmission Electron Microscope, TEM) – jako źródło informacji o badanej próbce wykorzystuje właściwości wiązki elektronów, która częściowo przechodzi przez badany materiał, a częściowo ugina się na siatce dyfrakcyjnej. Umożliwia uzyskanie powiększenia rzędu 1 000 000 razy i rozdzielczości ok. 1 nm. Uzyskanie takich powiększeń możliwe jest dzięki zastosowaniu wiązki elektronów do prześwietlania obserwowanego obiektu.

Skaningowa Mikroskopia Elektronowa (Scanning Electron Microscopy, SEM) – rodzaj mikroskopu elektronowego, który tworzy obrazy próbki poprzez skanowanie jej zogniskowaną wiązką elektronów.

Modelowanie Elementów Skończonych (Finite Element Modelling, FEM) – numeryczna metoda rozwiązywania problemów z zakresu inżynierii i fizyki matematycznej (aby rozwiązać problem, dzieli duży problem na mniejsze, prostsze części, zwane elementami skończonymi).

Wysokowydajna charakteryzacja nanoelektryczna półprzewodnikowych ogniw słonecznych na bazie nanoprzewodów

Bieżący projekt wykroczy poza aktualny stan techniki poprzez rozwijanie metod spójności pomiarowej do badań spektroskopii prądowo-napięciowej I-V na poszczególnych połączeniach nanoprzewodu w ciemności i przy oświetleniu, z wykorzystaniem nowego przewodzącego AFM, wyposażonego w sondę MEMS-SPM i sprzężonego z komercyjną wersją AFM, pracującego w trybie kontaktowym. Oczekiwana względna niepewność pomiarowa jest na poziomie 10 %. Ponadto, wykorzystując technikę, która umożliwi nanodrukowanie przewodzących końcówek materiałów (tipy) w nanodruku 3D, zostaną opracowane nowe zoptymalizowane geometrie końcówek do charakteryzacji nanoprzewodów, które umożliwią charakteryzację nanoelektryczną nanoprzewodu.

Po raz pierwszy zostaną wykonane spójne pomiarowo profile stężenia domieszki za pomocą skaningowego mikroskopu mikrofalowego SMM, poprzez indywidualne sondowanie górnych obszarów domieszkowanych, usytuowanych wertykalnie nanoprzewodów (przymocowanych do podłoża w dolnej części) w trybie nieniszczącym i w warunkach środowiskowych kompatybilnych z konstrukcją ogniw słonecznych na bazie nanoprzewodów. Docelowa niepewność względna stężenia domieszki wyniesie poniżej $\pm 10\%$.

Wysokowydajna charakterystyka nanomechaniczna urządzeń na bazie nanoprzewodów

Głowica MEMS-SPM, zdolna do pomiarów mechanicznych, zostanie rozbudowana o funkcjonalność pomiarów elektrycznych. Ten nowy, przewodzący układ MEMS-SPM o rozdzielczości 10 pm i maksymalnej sile testowej 10 mN umożliwi spójny pomiarowo pomiar bezpośrednich i odwrotnych właściwości piezoelektrycznych nanoprzewodów, stosowanych w nanourządzeniach do pozyskiwania energii typu ruch-energia. Po raz pierwszy przewodzący AFM zostanie wyposażony w tę nową głowicę MEMS-SPM z przewodzącymi sondami diamentowymi i sprzężony z zaawansowanym, pracującym w trybie kontaktowym AFM, opracowanym do pomiarów generacji piezoelektrycznej.

Ponadto opracowane zostaną innowacyjne sondy diamentowe AFM z uformowanymi końcówkami piramidowymi oraz nowe przewodzące końcówki otrzymane techniką nanodruku 3D, które umożliwiają stabilne, jednoczesne pomiary elektryczne i mechaniczne indywidualnych nanoprzewodów. Sonda AFM, wyposażona

w znormalizowaną (ISO-14577) końcówkę węgelnika, po raz pierwszy pozwoli powiązać mechaniczne pomiary nanomateriałów, za pomocą nanomechanicznych AFM-ów, z pomiarami nanomechanicznymi za pomocą tradycyjnych zwalidowanych instrumentów.

W celu dalszego zwiększenia wydajności pomiarów mechanicznych opracowana zostanie mikrosonda o szybkim rezonansie kontaktowym CR (contact resonance). Szybkość śledzenia próbek częstotliwości rezonansowej będzie zwiększona z 10 do więcej niż 100 kSamples/sec.

Technika Rezonansu Kontaktowego (Contact Resonance Technique, CR) – technika, opierająca się na zasadzie, że częstotliwość rezonansu kontaktu i współczynnik jakości Q wspornika AFM zmieniają się w odpowiedzi na zmiany sztywności i tłumienia końcówka-próbka.

Szybkie obrazowanie termiczne nanoprzewodów

Skaningowy Mikroskop Termiczny SThM (Scanning Thermal Microscope) zostanie ulepszony w celu zmniejszenia niepewności pomiarowej przewodności cieplnej z 20 % do 10 %, w przypadku płaskich próbek izotropowych i dla materiałów o przewodności cieplnej mniejszej niż $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Co więcej, badania z zastosowaniem powyższej aparatury, w połączeniu z technikami bezdotykowymi, umożliwią szybkie obrazowanie defektów lokalnych w urządzeniach opartych na matrycach z nanoprzewodów, takich jak ogniwa słoneczne. W badaniach tych planowana jest ścisła współpraca Głównego Urzędu Miar z Katedrą Nanometrologii Politechniki Wrocławskiej. Rozwiązaniem, w tym wypadku, będzie nowa konstrukcja układu pomiarowego, za pomocą którego obserwowana będzie odpowiedź termiczna ostrza przeznaczonego do pomiaru właściwości termicznych nanowłókna. Pomiary te będą kojarzone z technologiami MEMS, co stanowi o innowacyjności proponowanej przez GUM i Katedrę Nanometrologii technologii.

Skaningowy Mikroskop Termiczny (Scanning Thermal Microscopy, SThM) – rodzaj SPM, w którym sonda jest wykorzystywana jako czujnik termiczny.

Wpływ na środowisko przemysłowe i innych użytkowników

Zastosowanie w przemysłowej aparaturze badawczej nowych trybów pomiarowych, opartych na kontakcie, pozwoli na przeprowadzanie jednoczesnego pomiaru wymiarów geometrycznych, właściwości elektrycznych, termicznych oraz mechanicznych powierzchni, takich jak elastyczność, twardość, lepkość, naprężenie, tarcie i przyczepność oraz grubość nanomateriałów. Przewodzący AFM z obciążeniem prądu stałego i mikrofalami, sprzężony z różnymi typami AFM z modulacją siły, w połączeniu z pomiarami prądów indukowanych

wiązką elektronów EBIC (Electron Beam Induced Current) i katodoluminescencją CL (cathodoluminescence), mają duży potencjał do zbadania w jednym urządzeniu ogólnej wydajności, niechcianych mechanizmów strat, optymalnych częstotliwości pracy oraz starzenia. Tak zaawansowana aparatura badawcza z pewnością sprostą potrzebom przyszłej produkcji przemysłowej. Ponadto zaawansowana technologia sond diamentowych zapewni solidność i długowieczność, której obecnie brakuje w czujnikach kontaktowych. Powyższe działania projektowe spowodują, że przemysł pozyskiwania i magazynowania energii umocni swoją pozycję na rynku światowym i zapewni trwałe miejsca pracy.

Wpływ na metrologię i środowisko naukowe

Opracowane w projekcie spójne metody pomiarowe, do ilościowego określania kluczowych specyfikacji geometrycznych nanoprzewodów o wysokich proporcjach długości do średnicy, przyczynią się zasadniczo do dalszego rozwoju metrologii w dziedzinie nanomateriałów. W szczególności opracowane w tym projekcie zaawansowane techniki pomiarowe (włącznie z szybkim pomiarem liniowym powierzchni paneli ukierunkowanych nanoprzewodów) zapewnią płynne przełożenia uzyskanych rezultatów na zastosowania komercyjne.

Oddziaływanie na normy

Wyniki metrologiczne tego projektu, z dziedziny ogniw słonecznych na bazie nanoprzewodów, zostaną przedstawione Komitetom Normalizacyjnym, np. IEC/TC 113 „Nanotechnologia dla produktów i systemów elektrotechnicznych” oraz IEC/TC 82 „Słoneczne systemy energii fotowoltaicznej”, a także Polskiemu Komitetowi Normalizacyjnemu – KT 314 ds. Nanotechnologii, w celu wsparcia w tworzeniu nowych rozwiązań (obszar tematyczny, którym zajmuje się Komitet Techniczny ds. Nanotechnologii KT 314 jest identyczny jak tematyka, którą zajmuje się komitet ISO/TC 229 i CEN/TC 352). Zostaną opracowane przewodniki dobrych praktyk, które następnie rozpowszechnione zostaną w niemieckim Komitecie Technicznym VDI/VDE-GMA 3.41 „Technologia Pomiaru Powierzchni w zakresie Mikro- i Nanometrów”. W konsekwencji zostanie przeprowadzona standaryzacja nowych trybów pomiarowych.

Długoterminowe skutki gospodarcze, społeczne i środowiskowe

Opracowana w ramach tego projektu metrologia przyczyni się do kontroli jakości nowo opracowanych urządzeń do pozyskiwania i magazynowania energii, a tym samym przyczyni się do promowania i przyspieszenia

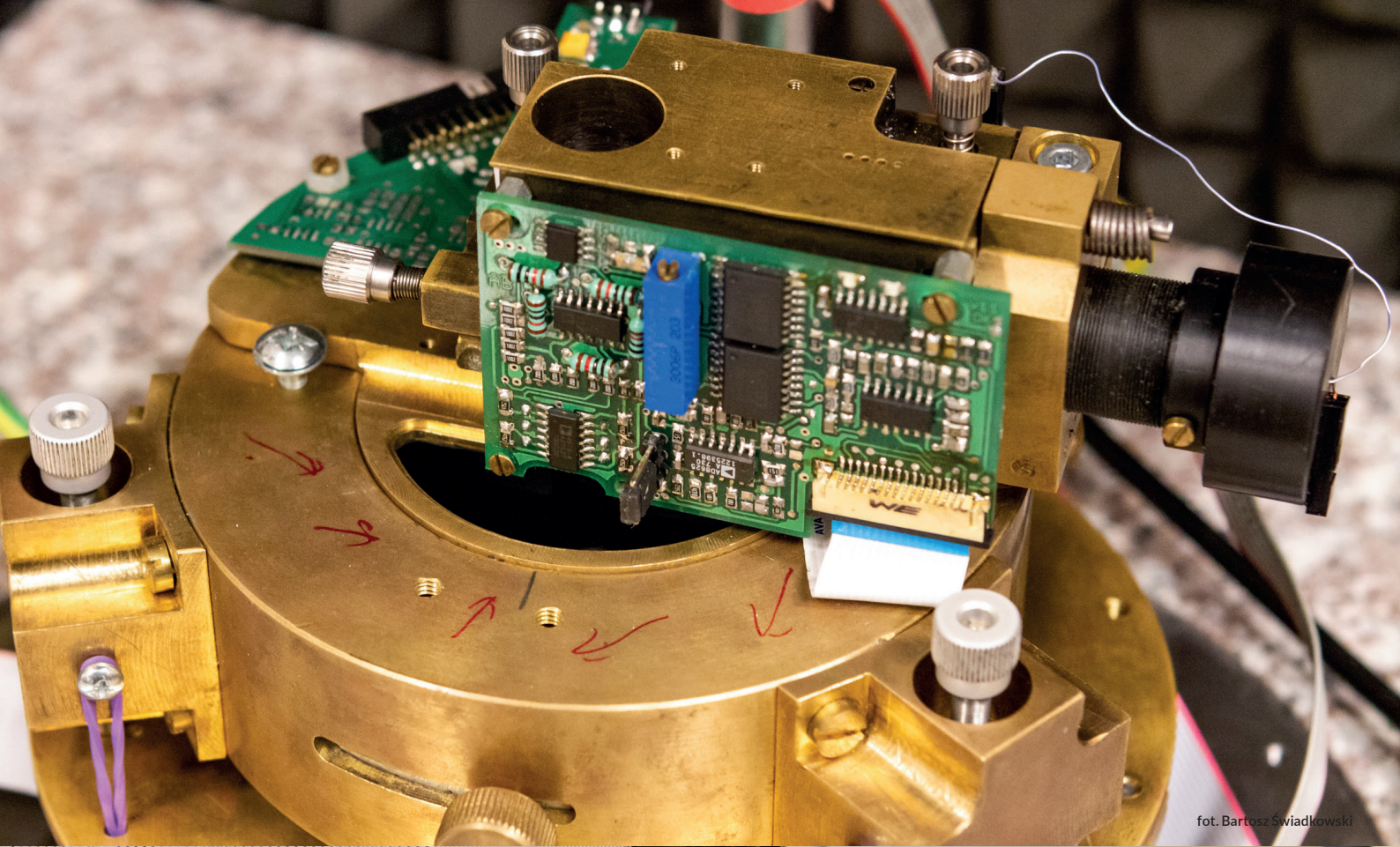
rozwoju i produkcji oraz włączy nowe nanotechnologie dla przemysłu energii odnawialnej. Wzmocni to odpowiedź Europy na wywołane przez człowieka zmiany klimatu.

Metrologia o wysokiej wydajności, mająca zastosowanie w kontroli jakości innowacyjnych urządzeń do pozyskiwania i magazynowania energii, znacznie poprawi konkurencyjność europejskiego przemysłu półprzewodników i energetyki przemysłowej. Opracowane wysoko wydajne techniki pomiarowe SPM mogą być również zastosowane do ultraszybkiej kontroli jakości bardzo precyzyjnych elementów, zwiększając w ten sposób konkurencyjność europejskiego przemysłu produkcyjnego.

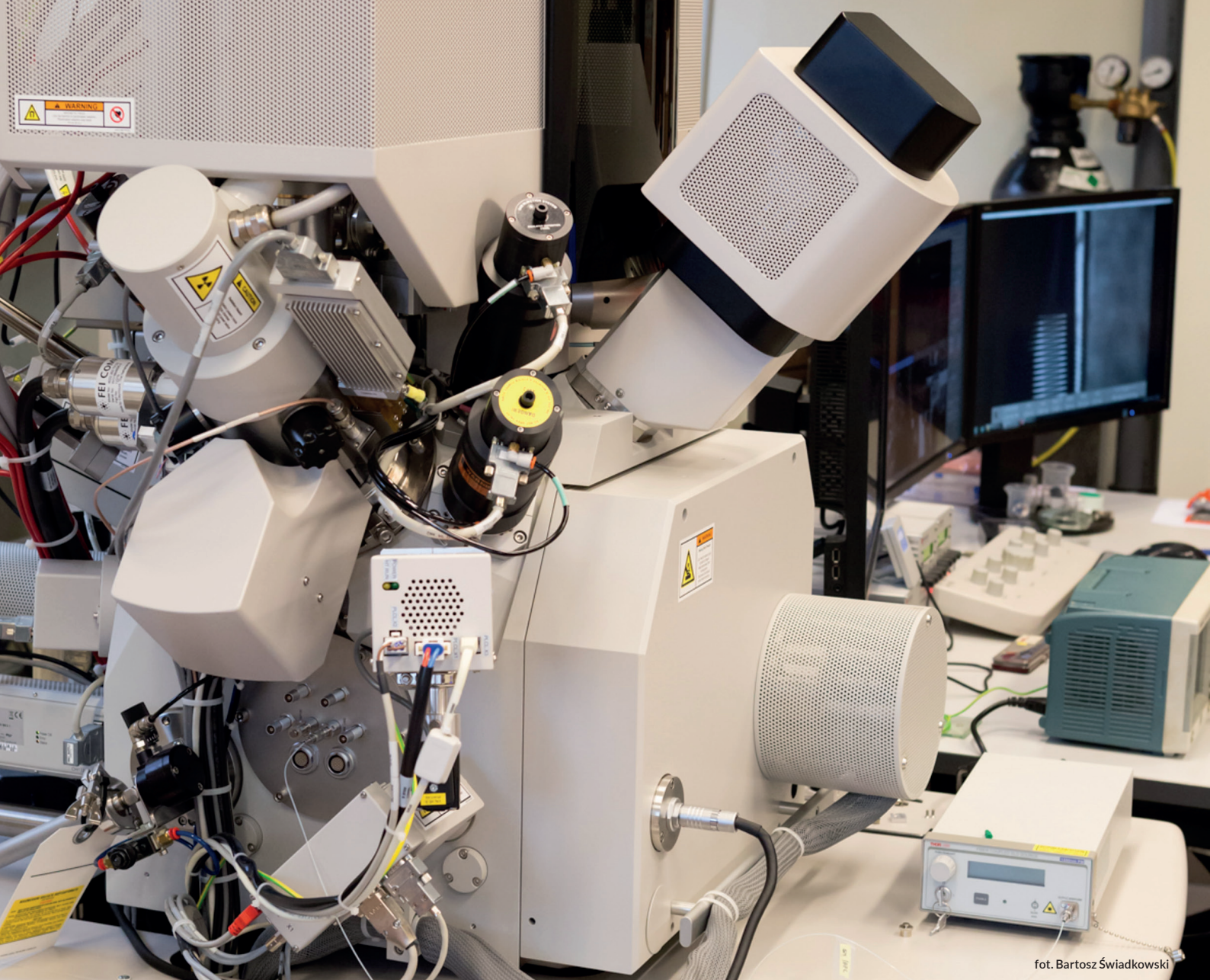
Współpraca Głównego Urzędu Miar i Politechniki Wrocławskiej w projekcie

W projekcie NanoWires planowana jest ścisła współpraca Głównego Urzędu Miar (finansowany jako pełnoprawny partner) z Katedrą Nanometrologii Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki (WEMiF) Politechniki Wrocławskiej, kierowaną przez prof. dr hab. inż. Teodora Gotszalka. Współpraca ta ma dotyczyć metrologii pojedynczych nanowłókien, służących do pozyskiwania energii. Pomiary takie będą prowadzone metodami mikroskopii bliskich oddziaływań SPM (Scanning Probe Microscopy), co pozwoli na obserwacje napięć i ładunków wytwarzanych oraz właściwości termicznych w nanostrukturze, w skali ułamków nanometra. Przykładową głowicę mikroskopu bliskich oddziaływań przedstawiono na rys. 1. Pomysłem Katedry Nanometrologii i zespołu GUM jest osadzanie nanowłókien na specjalizowanych podłożach wykonywanych w technologii układów mikro-elektromechanicznych MEMS. W założeniu podłoża te pozwalają na polaryzację nanonstruktur, ich zawieszenie ponad wnękami i jednoznaczne adresowanie. Proces osadzania nanowłókien będzie prowadzony ze wsparciem technologii skaningowej mikroskopii elektronowej i zogniskowanej wiązki jonów SEM-FIB (Scanning Electron Microscopy and Focused Ion Beam), skojarzonych z technikami nanorobotycznymi (rys. 2). W ten sposób możliwy będzie pomiar właściwości wskazanych nanowłókien w zdefiniowanych miejscach. Badania i pomiary będą prowadzone w różnych laboratoriach partnerów uczestniczących w projekcie NanoWires (przy wsparciu UJ oraz ITE), co przekłada się wprost na wzrost niezawodności obserwacji i ich spójność.

Najważniejsze dane dotyczące projektu 19ENG05 NanoWires przedstawiono w tab. 1.



fot. Bartosz Świądkowski



fot. Bartosz Świądkowski

Tab. 1. Dane projektu 19ENG05 NanoWires

19ENG05 NanoWires „High throughput metrology for nanowire energy harvesting devices”	
Początek i czas realizacji projektu	1 września 2020, 36 miesięcy
Koordynator: Dr. Uwe Brand, PTB, Tel: +49 531 592 5100, E-mail: uwe.brand@ptb.de Adres strony internetowej: https://www.ptb.de/empir2020/nanowires/home/	
KONSORCJUM	
1.	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Niemcy
2.	Česky Metrologický Institut (CMI), Brno, Czechy
3.	Dansk Fundamental Metrologi A/S (DFM), Dania
4.	Central Office of Measures (GUM), Polska
5.	Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Włochy
6.	Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Francja
7.	VSL B.V. (VSL), Holandia
8.	Aalto-korkeakoulusäätiö sr (Aalto), Finlandia
9.	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Francja
10.	Electrosiences Limited (ELECTRO), Wielka Brytania
11.	GETec Microscopy GmbH (GET), Austria
12.	Politechnika Wrocławska (PWR), Polska
13.	The Provost, Fellows, Foundation Scholars and the other members of Board, of the College of the Holy and Undivided Trinity of Queen Elizabeth near Dublin (TCD), Irlandia
14.	Technische Universitaet Braunschweig (TUBS), Niemcy
15.	Universidad Autonoma de Barcelona (UAB), Hiszpania
16.	Concept Scientific Instruments (CSI), Francja
17.	Ecole Centrale de Lyon (ECL), Francja

Podsumowanie

Nanoprzewody półprzewodnikowe, małe cylindryczne kryształy o średnicy około 100 nm i stosunkowo długie, można tak zaprojektować, aby wytwarzały niewielkie ilości energii elektrycznej. Skalowalność tych materiałów może potencjalnie przyczynić się do spełnienia europejskich wymogów, dotyczących energii elektrycznej, pochodzącej ze źródeł zerowej emisji dwutlenku węgla. Może to zostać osiągnięte poprzez zwiększenie wydajności konwersji słonecznej energii fotowoltaicznej

lub poprzez pozyskiwanie energii pochodzącej z gradientów temperatury i odkształceń mechanicznych. W celach praktycznych nanoprzewody są wytwarzane w układach o wymiarach do kilku metrów kwadratowych. Kluczowe znaczenie dla zrozumienia wykonalności ekonomicznej ma zrozumienie odpowiednich obliczeń kosztów i korzyści związanych z konwersją energii, w tym takiego zagadnienia, jak właściwości poszczególnych nanoprzewodów odnoszą się do ogólnej wydajności urządzenia.

W zrealizowanym w latach 2010–2013 projekcie EMRP ENGO2 [4] nie udało się ustalić ilościowego powiązania dla elektromechanicznych odbiorników energii, ponieważ dostępne wówczas metody pomiarowe nie były wystarczająco dokładne. Metody zapewniania kontroli jakości w produkcji na większą skalę są również uznawane za niewystarczające dla tego zadania.

Rys. 1. Głowica mikroskopu bliskich oddziaływań do badań nanowłókien

Rys. 2. Skaningowy mikroskop elektronowy ze zogniskowaną wiązką jonów do osadzania nanowłókien układów pozyskiwania energii

W ramach projektu EMPIR 19ENG05 NanoWires opracowane zostaną nowe metody pomiarowe, które pozwolą lepiej zrozumieć działanie urządzeń do pozyskiwania energii opartych na pionowych nanoprzewodach, w tym w ogniwach słonecznych. Opracowane zostaną również metody i modele wspierające produkcję urządzeń opartych na nanoprzewodach. Ponadto zostaną opracowane nowe materiały odniesienia, wzorce i unikatowe technologie pomiarowe, a także określona zostanie niepewność pomiarowa dla stężenia domieszki i pomiarów przewodnictwa cieplnego.

Główny Urząd Miar, we współpracy z Katedrą Nanometrologii Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, przeprowadzi badania dotyczące metrologii pojedynczych nanowłókien służących do pozyskiwania energii. Pomiary takie będą prowadzone metodami mikroskopii bliskich oddziaływań, co pozwoli na obserwacje napięć i ładunków wytwarzanych oraz właściwości termicznych w nanostrukturze w skali ułamków nanometra. Zespoły te będą osadzały nanowłókna na specjalizowanych podłożach wykonywanych w technologii MEMS. Proces osadzania nanowłókien będzie prowadzony ze wsparciem technologii skaningowej mikroskopii elektronowej i zogniskowanej wiązki jonów skojarzonych z technikami nanorobotycznymi. W ten sposób możliwy będzie pomiar właściwości wskazanych nanowłókien w zdefiniowanych miejscach.

Oczekuje się, że technologie i metody opracowane w ramach projektu NanoWires wskażą nowe sposoby poprawy wydajności i jakości urządzeń do pozyskiwania energii z nanoprzewodów i istotnie przyczynią się do wsparcia przemysłu energii odnawialnej w Europie.



Janusz D. Fidelus

Pracuje w Głównym Urzędzie Miar w Pracowni Siły i Twardości, przedstawiciel GUM w KT 314 PKN ds. Nanotechnologii. Stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie inżynierii materiałowej uzyskał na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wiedzę i doświadczenie w zakresie wytwarzania i charakteryzacji materiałów i nanomateriałów funkcjonalnych do zastosowań w technice i medycynie zdobywał podczas zagranicznych stypendiów naukowych (Instytut Naukowy Weizmanna, ETH Zürich) oraz w krajowych instytutach badawczych (IWC PAN, IF PAN) i firmach z prywatnym kapitałem (InPhoTech, PCFS), twórca i współtwórca kilku patentów i technologii wytwarzania innowacyjnych materiałów oraz autor i współautor ok. 50 publikacji w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych (HI=10).

Bibliografia

- [1] Nayak P. K., Mahesh S., Snaith H. J., i in.: Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. *Nat. Rev. Mater* 4 (2019), s. 269-285.
- [2] Fidelus J.D., Zhydachevskii Ya., Paszkowicz W., Reszka A., Dłużewski P., Suchocki A.: Enhancement of luminescence of nanocrystalline $\text{TiO}_2\text{:Yb}^{3+}$ nanopowders due to co-doping with Nd^{3+} ions. *Optical Materials* 47 (2015), s. 361-365.
- [3] High throughput metrology for nanowire energy harvesting devices, 19ENG05 NanoWires. <https://www.ptb.de/empir2020/nanowires/project/overview/>
- [4] Projekt EMRP ENG02.
- [5] Priya S., Inman D.: *Energy Harvesting Technologies*. Springer 2009.
- [6] Fidelus J. D., Karbowski A., Mariazzi S., Werner-Malento E., Brusa R. S., Zhou W., Karwasz G. P.: Combined positron-annihilation and structural studies of hydrothermally grown zirconia. *Nanomaterials and Energy* 1 (2012), s. 97-105.

Acknowledgments

The 19ENG05 NanoWires project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Funder ID: 10.13039/100014132.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States



Teodor Gotszalk

Kierownik Katedry Nanometrologii Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, która jako jedyna w Polsce zajmuje się kompleksową metrologią (rozumianą w znaczeniu badań ilościowych) mikro- i nanostruktur realizowaną metodami i technikami mikroskopowymi, dyfrakcyjnymi, elektrycznymi i optycznymi. Stypendysta DAAD, Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, Komisji Fulbrighta. Pracował w laboratoriach badawczo rozwojowych koncernu SIEMENS. Od 2015 r. profesor zwyczajny PWR czynnie zaangażowany w prace dydaktyczne i naukowe badawcze, członek paneli eksperckich w programach Komisji Europejskiej, autor i współautor ponad 40 projektów badawczych oraz ok. 200 prac w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych (HI=25).