

Witold Łojkowski, Prof. Dr hab.  
Instytut Wysokich Ciśnień PAN  
Sokołowska 29/37, 01-142 Warszawa.  
w.lojkowski@labnano.pl; www.labnano.pl

## **Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym Dr inż. Rafała Kowerdzieja w dziedzinie nauk inżyniersko- technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

Podstawa recenzji: Pismo z dn. 20 listopada 2023 od Prof. Dr Hab. Inż. Krzysztofa Czupryńskiego, Dziekana Wydziału Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej informujące o decyzji Rady Doskonałości Naukowej o wyznaczeniu mnie na recenzenta.

### **1. Sylwetka Dr inż. Rafała Kowerdzieja, zwanego dalej Habilitantem.**

Uzyskanie stopnia naukowego doktor habilitowany to etap na drodze do Profesury. Zatem oceniając sylwetkę habilitanta, kierowałem się kryteriami ustawowymi oraz kryterium czy habilitant rokuje być dobrym profesorem. Oznacza to być nauczycielem, liderem, kierować zespołem, a w naukach technicznych, dążyć do praktycznego zastosowania wiedzy.

Habilitant przez całe swoje życie zawodowe był zatrudniony w Instytucie Fizyki Technicznej, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, gdzie ukończył studia.

Rozprawa doktorska habilitanta została obroniona z wyróżnieniem. W konkursie z 2014 roku Polskiego Towarzystwa Ciekłokrystalicznego uznano ją za najlepszą pracę doktorską.

Po uzyskaniu doktoratu, Habilitant kierował trzema projektami badawczymi z dziedziny badań podstawowych: Preludium, Sonata, oraz Juventus Plus. Obecnie kieruje grantem Sonata Bis. Wiedząc jak trudno wygrać w konkursach o granty NCN trzeba uznać, że ich przyznanie samo w sobie pokazuje bardzo wysoki poziom naukowy prac prowadzonych przez Habilitanta. Wymienione projekty wymagają koordynacji prac zespołu badawczego, zatem Habilitant wykazał się umiejętnościami w tym zakresie.

Habilitant dwukrotnie był laureatem prestiżowego stypendium Start Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. W 2020 roku został laureatem konkursu dla wybitnych młodych naukowców Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Habilitant Pełnił rolę kierownika w Projekcie Canaletto w ramach współpracy z naukowcami z Italii i odbył ważne staże badawcze we Włoszech. Efektem tych stażów był rozdział *Hybrid Metastructures Enabled by Dual-Frequency Liquid Crystals* w książce „*Hybrid Flatland Metastructures*”, oraz kilka wspólnych z autorami zagranicznymi publikacji naukowych w uznanych czasopismach z listy filadelfijskiej.

Załączone do dokumentacji publikacje pokazują umiejętność współpracy z innymi jednostkami badawczymi: Università della Calabria, Consilio Nazionale delle Ricerche, Politechniką Warszawską, Instytutem Fizyki PAN i innymi.

Habilitant od uzyskania tytułu doktora odbył wiodącą rolę w opublikowaniu 10 publikacji w czasopismach wysokiej rangi naukowej. Jest to jedna publikacja rocznie. Łącznie od 2014 roku jest współautorem 18 publikacji. Skuteczne publikowanie świadczy o umiejętności dobrej organizacji pracy. Wg google scholar indeks h = 15 a cytowań jest 546. Jest to index odpowiedni do stopnia rozwoju kariery oraz dziedziny nauki.

Habilitant wykazuje się doświadczeniem dydaktycznym, w tym promotorstwem pomocniczym w dwóch pracach doktorskich. Był współorganizatorem międzynarodowych konferencji, za co został wyróżniony przez Rektora WAT. Aktywnie działał dla popularyzacji nauki. Był laureatem konkursu dla wybitnych młodych naukowców organizowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na lata 2020-2023.

Powyższe informacje wskazują jednoznacznie na bardzo dobre kwalifikacje Habilitanta do uzyskania stopnia Doktor Habilitowany i są pozwalają oceniać wysoko jego kwalifikacje jako przyszłego profesora.

## **2. Ocena osiągnięcia naukowego**

Autoreferat streszcza i omawia zawartość cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, tworzących razem opis osiągnięcia naukowego.

### **Tytuł osiągnięcia: Przejrzalne metamateriały hybrydowe.**

Autoreferat jest starannie opracowany pod względem edycyjnym. Zawiera zarówno informacje adresowane do szerszego grona naukowców, jak i do ekspertów w dziedzinie metamateriałów. Omówiono poszczególne publikacje oraz syntetycznie całość pracy. Przedstawione są ilustracje graficzne.

Metamateriały elektromagnetyczne to niewystępujące naturalnie w przyrodzie, periodyczne struktury kompozytowe typu metal-dielektryk, które oddziałują rezonansowo jednocześnie z polem elektrycznym i magnetycznym fali elektromagnetycznej.

Efektami prac są nowe funkcjonalnie metamateriały o przejrzalnych parametrach, technologia ich wykonania oraz modele teoretyczne objaśniające fizyczne podstawy ich działania. Mogą one stanowić bazę do wytwarzania nowatorskich urządzeń fotonicznych i optoelektronicznych, takich jak np. modulatory optyczne, filtry, absorbery, czy przejrzalne przesuwniki fazy, o parametrach niemożliwych do uzyskania przy zastosowaniu standardowych, obecnie stosowanych materiałów.

Mogą one służyć do przejrzania promieniowania elektromagnetycznego. Opracowane przez Habilitanta metamateriały mogą być stosowane do przejrzania amplitudy i fazy fal elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości THz, zakresie widzialnym oraz w bliskiej i średniej podczerwieni. Składają się one ze cienkich metalicznych struktur wykonanych metodami litografii na niskostratnych podłożach dielektrycznych. W uzyskaniu możliwości przejrzania Habilitant wykorzystał mieszaniny ciekłokrystaliczne oraz grafen. W publikacjach i autoreferacie opisany jest sposób otrzymywania metamateriałów, sposoby ich charakteryzacji, obliczenia numeryczne pozwalające na projektowanie optymalnych struktur, wyjaśnianie właściwości oraz wyniki przejrzalności. Referat podzielony jest na rozdziały :

### **Przejrzalne mikrostruktury metamateriałowe.**

Głównym celem prac w tej części badań była optymalizacja przejrzalności rozumianej jako zmiana amplitudy i fazy transmitancji i reflektancji. Przejrzalność elektryczna następuje poprzez reorientację molekuł ciekłego kryształu pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego. Przejrzalność termiczna następuje przez doprowadzenie do przejścia fazowego nematyk– ciecz izotropowa w ciekłym kryształ. Uzyskano najwyższą wartość przejrzalności termicznej w ciekłokrystalicznych przetwornikach metamateriałowych w zakresie THz.

## **Przestrjalne nanostruktury metamateriałowe.**

Ten rozdział omawia dwa zagadnienia:

1. Zaprojektowanie, symulacje elektromagnetyczne oraz optymalizację przestrjalnego elektrycznie, dwupasmowego idealnego absorbera metamateriałowego na zakres bliskiej podczerwieni.
2. Skrócenie czasów odpowiedzi przestrjalnych przetworników metamateriałowych w zakresie widzialnym.

Modulator metamateriałowy dzięki wykorzystaniu dwuczęstotliwościowego ciekłego kryształu pozwala w czasie poniżej 1 milisekundy przestrajać i kontrolować amplitudę i fazę przechodzącego promieniowania. Może również zachowywać się jak efektywny przewodnik lub izolator dla określonych długości fal. Tego typu urządzenia mogą znaleźć zastosowanie m.in. jako detektory sygnałów radarów szumowych oraz modulatory fal elektromagnetycznych do amunicji inteligentnej.

## **Aktywne metamateriały hiperboliczne**

Ta część autoreferatu omawia projektowanie, symulacje elektromagnetyczne oraz analizę teoretyczną przestrjalnych metamateriałów hiperbolicznych w zakresie średniej podczerwieni. Efektem prac było opracowanie koncepcji przestrjalnych i ultracienkich urządzeń fonicznych - modulatora odbicia, (który może również pełnić rolę filtra krawędziowego bądź pasmowo-przepustowego) oraz mikrownęki rezonansowej. Urządzenia te bazują na dwóch metamateriałach hiperbolicznych: krzemionkę oraz grafen. Powstała wszechstronna platforma do manipulacji fal z zakresu średniej podczerwieni, która może znaleźć zastosowanie w wielofunkcyjnych urządzeniach optoelektronicznych, ultraczułych filtrach, bezabberacyjnych soczewkach, chipach fonicznych. Mogą też być zastosowane, we współczesnych systemach telekomunikacyjnych gdzie wymagana jest duża szybkość działania. Zastosowanie nowego typu filtrów poprawiło by funkcjonalność kamer na podczerwień, dalmierzy optycznych, detektorów skażeń i innych urządzeń.

Na podstawie Autoreferatu i załączonych publikacji stwierdzam, że Habilitant stworzył platformę technologiczną dla szeregu ważnych zastosowań, gdzie wymagane jest modulowanie promieniowania elektromagnetycznego. Platforma technologiczna obejmuje metody wytwarzania, charakteryzacji oraz modelowania komputerowego i oparta jest o fizyczne modele zjawisk. Nowe metamateriały hybrydowe otwierają możliwości projektowania mikroukładów aktywnych z możliwością przełączania i modulacji fal elektromagnetycznych. Mogą służyć do budowy wielofunkcyjnych urządzeń fonicznych, których właściwości można aktywnie modulować, poza zakresem dotychczas stosowanych technologii. Szczególne znaczenie ma przestrajalność wytworzonych systemów w ich oddziaływaniu z promieniowaniem elektromagnetycznym, szeroki zakres częstotliwości pracy oraz inne wymienione zalety nowych metamateriałów.

Osiągnięcia te wymagały współpracy zespołu współpracowników o uzupełniających się kompetencjach, a jednocześnie przyjęcia przez Habilitanta roli lidera, konsekwentnie rozwijającego prace w wytyczonym kierunku: przestrajalne metamateriały. Wynik naukowy jest bardzo ciekawy naukowo, inspirujący i o dużym znaczeniu praktycznym. Zatem osiągnięcie naukowe jest mocnym argumentem za przyznaniem stopnia naukowego Doktor Habilitowany oraz otwarcia drogi do przyszłej profesury.

Całość przedstawionych wyników zasługuje na określenie osiągnięć Habilitanta jako wybitne.

**Osiągnięcia opisane w Autoreferacie można streścić w sposób dostępny dla szerokiego grona inżynierów i naukowców , oraz osób zainteresowanych techniką w następujący sposób:**

Bardzo ważne we współczesnym świecie jest opanowanie technologii przestrajania fal elektromagnetycznych: zmiana ich częstotliwości, zmiana fazy i zmiana polaryzacji.

Możliwości te są wykorzystywane w urządzeniach do komunikacji, czujnikach, radarach i innych. Do tej pory zadanie to nie jest wystarczająco dobrze rozwiązane. Jest potrzeba zwiększenia zakresu przestrajania, ulepszyć ten proces i zmniejszyć koszty.

Metamateriały pozwalają przestrajac fale elektromagnetyczne. Są to regularne struktury z materiałów przewodzących, na podłożach neutralnych dla promieniowania i nie przewodzących prądu, w których pod wpływem promieniowania, indukują się lokalne pola elektromagnetyczne. Wykonywane są metodami litografii. Można je sobie wyobrazić jako układy bardzo małych magnesów i dipoli elektrycznych, które pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego emitują własne promieniowanie elektromagnetyczne.

Jednak do tej pory nie było wystarczających możliwości ich strojenia, tak aby modyfikowały promieniowanie padające z zaprogramowany sposób. W wyniku prowadzonych przez habilitanta prac, które zostały opublikowane w 10 publikacjach, powstały skuteczne metody strojenia metamateriałów.

Jedna z metod polega na ich pokryciu warstwą ciekłych kryształów. Modyfikują one sposób oddziaływania metamateriałów z promieniowaniem, a sposób w jaki modyfikują można regulować przykładając do warstw pole elektryczne lub zmieniając temperaturę. Wykazano skuteczność strojenia i stworzono modele teoretyczne objaśniające zjawiska.

Druga z metod polega na nałożeniu na metamateriał warstw grafenu. Okazało się, że grafen modyfikuje to oddziaływanie z promieniowaniem elektromagnetycznym. Sposób oddziaływania można stroić przykładając pole elektryczne o niskim napięciu do warstwy grafenu. Okazało się, że właściwości systemu zależą od ilości warstw i ich typu. Powstały filtry krawędziowe, tzn filtry obcinające częstotliwość emitowanej fali, o strojonej krawędzi i bardzo szybkim działaniu. W tym przypadku również działanie systemu jest zgodne z modelem teoretycznym.

Wyniki pracy otworzyły drogę do szerokiego stosowania strojonych metamateriałów w wielu dziedzinach techniki.

Całość pracy pokazuje przywódczy i twórczy charakter habilitanta, konsekwentnie doskonalącego opracowane technologie strojenia metamateriałów.

## **Podsumowanie**

Po zapoznaniu się z otrzymanymi materiałami stwierdzam, że Dr inż. Rafał Kowerdziej bez żadnych wątpliwości zasługuje na otrzymanie stopnia naukowego Doktora Habilitowanego. Habilitant wykazał umiejętność konsekwentnego dążenia do celu w pracy zespołowej, łącząc umiejętności naukowe, technologiczne, dydaktyczne, organizacyjne i popularyzatorskie. Podejmuje działania dla praktycznych zastosowań. Dorobek Habilitanta spełnia wymagania art. 219 ust. 1 pkt 2. Ustawy PSWN.