

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel. 22 234 5689.
e-mail: tomasz.wolinski@pw.edu.pl

Ocena rozprawy doktorskiej pt.:
“Photonic advances in hiperbolic metamaterials”
ALESSANDRO PIANELLI, MSc

Rozprawa doktorska Alessandro Pianelli, MSc napisana w języku angielskim pt.: ***“Photonic advances in hiperbolic metamaterials”*** (co w wolnym tłumaczeniu oznacza „*Osiągnięcia inżynierii fotonicznej wykorzystującej metamateriały hiperboliczne*”) została wykonana na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Janusz Parka.

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje zarówno symulacje numeryczne jak i badania eksperymentalne i dotyczy szczególnej klasy metamateriałów zwanej metamateriałami hiperbolicznymi HMM (ang. *hyperbolic metamaterial*), które charakteryzują się hiperboliczną dyspersją.

Metamateriały, czyli ośrodki o ujemnym współczynniku załamania nie występują naturalnie w przyrodzie. Są zbudowane w oparciu o periodycznie rozłożone komórki elementarne pełniące rolę sztucznych atomów. Rozmiary komórek elementarnych są kilkukrotnie mniejsze od długości fali, a mimo to cała struktura może oddziaływać z falą elektromagnetyczną. W metamateriałach hiperbolicznych będących tematem recenzowanej rozprawy podfalowe warstwy przewodzące są naprzemiennie ułożone z warstwami dielektrycznymi. Rolę przewodnika może pełnić np. grafen lub ITO, zaś warstwa dielektryka może być zbudowana np. z krzemionki.

W tym kontekście tematyka rozprawy doktorskiej Alessandro Pianelli jest nowatorska, a jednocześnie uzyskane przez Doktoranta wyniki zawierają w sobie duży potencjał aplikacyjny, który może znaleźć zastosowanie zarówno w biosensorach optycznych jak i wielofunkcyjnych układach fotonicznych tj. przestrajalne filtry czy modulatory fal elektromagnetycznych o bardzo krótkich czasach przełączania.

Według bazy *Web of Science* Alessandro Pianelli był współautorem czterech prac z listy JCR opublikowanych w latach 2020-2021, spośród których następujące 3 prace są bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej:

- [1] **Alessandro Pianelli**, Rafał Kowerdziej, Michał Dudek, Karol Sielezin, Marek Olifierczuk, and Janusz Parka. Graphene-based hyperbolic metamaterial as a switchable reflection modulator. *Optics Express*, 28(5):6708–6718, 2020.

- [2] Vincenzo Caligiuri, **Alessandro Pianelli**, Mario Miscuglio, Aniket Patra, Nicolò Maccaferri, Roberto Caputo, and Antonio De Luca. Near-and midinfrared graphene-based photonic architectures for ultrafast and low-power electro-optical switching and ultra-high-resolution imaging. *ACS Applied Nano Materials*, 3(12):12218–12230, 2020.
- [3] Michał Dudek, Rafał Kowerdziej, **Alessandro Pianelli**, and Janusz Parka. Graphene-based tunable hyperbolic microcavity. *Scientific Reports*, 11(1):1–11, 2021.

Prace opublikowane w przeciągu 2 lat uzyskały już (stan z dnia 11.07.2022) 35 cytowań (wg bazy WoS), a sumaryczny współczynnik wpływu (*impact factor*) tych 3 prac wynosi ponad 15. Świadczy to bardzo dobrze o aktualności tematyki badawczej. Najwięcej cytowań (23) uzyskała praca z 2020 roku opublikowana w *Optics Express*, w której Doktorant jest pierwszym autorem. Doktorant jest również współautorem 20. prezentacji na konferencjach międzynarodowych w latach 2018-2022.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów wraz z podsumowaniem (*Summary*), pięciu dodatkowych rozdziałów (*Appendices*) oraz spisu literatury, który obejmuje 152 pozycje bibliograficzne i zawiera łącznie 134 strony. Dodatkowo numerowane pierwsze strony pracy (od I do XXI) zawierają streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis tabel i rysunków oraz spis stosowanych w pracy skrótów i symboli.

Zwykle na wstępie rozprawy doktorskiej formułowana jest – zgodnie z wielowiekową tradycją – TEZA, która ma być dowiedziona w trakcie pracy (w wielu językach nazwa rozprawy doktorskiej odzwierciedla ten fakt np. w języku angielskim *PhD Thesis* czy też w języku francuskim *thèse de doctorat*). W rozprawie doktorskiej Alessandro Pianelli brak jest jasno sformułowanej TEZY (*Thesis*), której dowód przeprowadzony zostałby w rozprawie. W zamian za to, w rozdziale 1. (*Introduction*) Doktorant przedstawia główne cele pracy, których zrealizowanie ma wykazać szczególne właściwości metamateriałów hiperbolicznych w zastosowaniach fotonicznych:

1. Wybór tanich i łatwo dostępnych materiałów do budowy struktur HMM o odpowiednich właściwościach plazmonicznych
2. Przeprowadzenie symulacji struktur hiperbolicznych w szczególności w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni
3. Wytworzenie eksperymentalne struktur HMM
4. Charakteryzacja powierzchni warstw metalicznych oraz dielektrycznych przy pomocy wybranych technik eksperymentalnych (SEM, AFM, elipsometria)
5. Przegląd potencjalnych zastosowań struktur HMM

W pewnym sensie możemy mówić o tezie domyslniej rozprawy wynikającej z realizacji tych pięciu celów. Warto byłoby, aby Doktorant w trakcie obrony ostatecznie sformułował TEZĘ (lub TEZY) swojej rozprawy.

Rozdział 2. (*Hyperbolic metamaterials introductory*) na kolejnych 30. stronach zawiera opis podstawowych właściwości metamateriałów hiperbolicznych, który stanowią główny temat rozprawy. Doktorant koncentruje się głównie na metamateriałach hiperbolicznych zbudowanych z nanostrukturalnych podfałowych warstw przewodzących naprzemiennie ułożonych z warstwami dielektrycznymi. Rozdział zawiera solidne podstawy fizyczne opisu

struktur HMM ze szczególnym uwzględnieniem metamateriałów hiperbolicznych o przenikalności dielektrycznych bliskich 0, „*epsilon-near-zero*” (ENZ) oraz „*epsilon-near-zero-and-pole*” (ENZP). W tym ostatnim przypadku pojawia się pewna osobliwość przenikalności dielektrycznej (jedna jej wartość, $\epsilon_{\parallel}$ jest bliska 0, podczas gdy druga, $\epsilon_{\perp}$ dąży do ∞). W rozdziale tym znalazł się na str. 12 ewidentny błąd w jednym z równań Maxwella (2.5) oraz na str. 24 niejednoznaczne sformułowanie; „*real imaginary part*”. Również dostrzegłem kilka literówek (np.: str. 31, początek podrozdziału 2.5.3 oraz str.33 linia 8)

Rozdział 3. (*Methodology*) przedstawia opis układów eksperymentalnych do pomiarów absorbancji, fotoluminescencji czasu życia fluorescencji przeprowadzonych w Tampere University podczas 2-miesięcznego pobytu w grupie prof. H. Caglayan. Szczególną uwagę Doktorant skoncentrował na spektroskopii ramanowskiej SERS (*surface-enhanced Raman spectroscopy*) oraz na procesach szybkiego przełączania TAS (*transient absorption spectroscopy*).

Rozdział 4. (*HMMs and its applications: experimental and simulations results*) przedstawia wyniki badań eksperymentalnych metamateriału hiperbolicznego na bazie Ag/TiO₂ o niezwykłych właściwościach plazmonicznych, który wykazuje zwiększenie emisji spontanicznej oraz wzmocnienie sygnału w spektroskopii ramanowskiej SERS. Świadczy to bardzo ciekawych zastosowaniach struktur HMM w inżynierii fotonicznej do opracowania przestrzajalnych laserów płaszczyznowych. czy też czujników SERS o podwyższonej czułości. Jest to bardzo istotne osiągnięcie Doktoranta – szkoda tylko, że nie doczekało się dobrej publikacji. W rozdziale tym po raz pierwszy wykazano eksperymentalnie, że kompatybilny z CMOS metamateriał hiperboliczny na bazie warstw TiN/ITO może mieć dwa ultraszybkie pasma przełączania: w zakresie widzialnym oraz w bliskiej podczerwieni. Dzięki temu nowatorskiemu podejściu Doktorant odkrył nową fotoniczną strukturę HMM, która może działać jako przestrzajalny i ultraszybki (femtosekundowy) całkowicie optyczny przełącznik z modulacją w zakresie od ok. 2 do 3,5 THz. Osiągnięcie to otwiera nowe perspektywy budowy nanofotonicznych modulatorów całkowicie optycznych i do tej pory nie zostało opisane w literaturze. Kolejnym ważnym wynikiem badawczym była struktura HMM oparta na warstwie metalicznej ITO charakteryzująca się silną nieliniowością w zakresie ENZP, odpowiedzialną za wzmocnienie Purcella, narzucając kompromis między zjawiskami wzmocnienia i kolimacji. Doktorant wykazał, że HMM oparty na ITO może w sposób aktywny a zarazem odwracalny kolimować wiązkę w szerokim zakresie. Rozdział 4. zawiera szereg bardzo ciekawych i nowych wyników badawczych, które powinny zostać opublikowane.

Rozdział 5. (*Active control of hyperbolic topological transition in Graphene HMMs*) poświęcony jest strukturom HMM wykonanym na bazie grafenu. Doktorant zbadał poprzez wykonanie symulacji numerycznych wydajność przełączania tych struktur w oknie telekomunikacyjnym pasma O osiągając modulację elektrooptyczną o szybkości przełączania około 40 GHz. Struktura grafenowa HMM wykazuje bezprecedensowy, przestrzajalny zakres kolimacji (do 5 μm) z bardzo wysoką rozdzielczością sięgającą 1/1660 długości fali. Może to być podstawą zbudowania nowej platformy fotonicznej do badań biologicznych w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale doczekały się trzech podanych powyżej publikacji Doktoranta [1], [2], [3], z których publikacja [1] w *Optics Express* z 2020 ma bardzo liczne (23) cytowania.

W ostatnim 6. Rozdziale (*Summary*) Doktorant przedstawia podsumowanie uzyskanych w rozprawie wyników i określa dalsze perspektywy zastosowania w fotonice metamateriałów hiperbolicznych.

Opisy wszystkich tabel (4.1, 4.2, 4.3, 4.4 oraz 5.1) zostały nietypowo umieszczone pod tabelami zamiast powyżej, co nie jest stosowane w rozprawach naukowych. W tekście rozprawy napisanej w języku angielskim dostrzegłem umiarkowaną liczbę błędów edytorskich, natomiast bardzo dużo błędów edytorskich w streszczeniu rozprawy w języku polskim. Zgodnie z obowiązującą ustawą (Artykułu 187, p.4, Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dz. Ustaw 2020 poz. 85) na Autorze rozprawy napisanej w języku obcym ciąży obowiązek przygotowania jej streszczenia w języku polskim. Obowiązek ten został formalnie dopełniony, chociaż należy podkreślić, że Doktorant uczynił to niezwykle niedbale.

Powyższe uwagi krytyczne nie wpływają na moją wysoce pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorant ze starannością opisuje i analizuje zarówno uzyskane wyniki numeryczne jak i wyniki badań eksperymentalnych. Świadczy to o poprawności i rzetelności warsztatu badawczego, a jednocześnie o sumienności i skrupulatności w badaniach eksperymentalnych i symulacjach numerycznych.

W podsumowaniu stwierdzam, iż zgodnie z obowiązującą ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85) recenzowana rozprawa doktorska **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, a przez to może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Alessandro Pianelli, MSc do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Warszawa, dnia 12.07.2022 r.

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński