

dr hab. inż. Karol Tarnowski  
Katedra Optyki i Fotoniki  
Wydział Podstawowych Problemów Techniki  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
e-mail: [karol.tarnowski@pwr.edu.pl](mailto:karol.tarnowski@pwr.edu.pl)  
tel: +48 71 320 44 41

Wrocław, 18.07.2022

**Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:**  
**„*Photonic advances in hyperbolic metamaterials*”**  
**mgr. inż. Alessandro Pianelli**

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Alessandro Pianelli podsumowuje przeprowadzone badania metamateriałów hiperbolicznych. W ramach pracy Autor zaprezentował tę klasę metamateriałów: podstawy teoretyczne, zasady projektowania, techniki wytwarzania oraz wykorzystywane metody pomiarowe, a przede wszystkim przedstawił ważne i przełomowe wyniki dotyczące metamateriałów hiperbolicznych. Praca powstała na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Janusza Parki.

Zagadnienia poruszone w rozprawie wpisują się w aktualną tematykę badawczą metamateriałów fotonicznych (w bazie Scopus odnotowano 207 artykułów naukowych opublikowanych w 2021 roku dla zapytania „photonic metamaterials”, a liczba ta rokrocznie rośnie). Duże zainteresowanie środowiska wiąże się z oczekiwanymi zastosowaniami w zakresie innowacyjnych źródeł światła, nowatorskich konstrukcji czujników o wysokiej czułości oraz komponentów optycznych pozwalających osiągnąć superrozdzielczość.

Mgr inż. Alessandro Pianelli jest współautorem pięciu artykułów naukowych opublikowanych w latach 2019-2022 w czasopismach naukowych o wysokich impact factor, natomiast wyniki zaprezentowane w rozprawie przez Autora zostały częściowo opublikowane w trzech artykułach naukowych:

- [1] **Alessandro Pianelli**, Rafał Kowrdziej, Michał Dudek, Karol Sielezin, Marek Olifierczuk, 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, Antonio De Luca, „Near- and mid-infrared 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 Kowrdziej, **Alessandro Pianelli**, Janusz Parka, „Graphene-based tunable hyperbolic microcavity,” *Scientific Reports* 11:74 (2021).

Szczególną uwagę zwraca artykuł [1], który – według bazy Scopus – był cytowany 24 razy.

Główna część rozprawy liczy 134 strony i zawiera 6 rozdziałów, 5 dodatków oraz zestawienie 152 pozycji bibliograficznych. Tekst uzupełnia część wstępna zawierająca: podziękowania, streszczenia w językach angielskim i polskim, spis treści oraz listy tabel, rysunków i skrótów. Układ dokumentu zawierającego łącznie 155 jest klarowny.

Rozdział 1 stanowi zwięzłe i przystępne wprowadzenie, które pozwala czytelnikowi odnaleźć się w tematyce rozprawy. Mgr inż. Alessandro Pianelli opisał przedmiot pracy jaki stanowią metamateriały fotoniczne oraz wyjaśnił cele pracy, którymi były: (i) wybór odpowiednich materiałów do konstrukcji metamateriałów hiperbolicznych, (ii) opracowanie struktur metamateriałów hiperbolicznych o pożądanym właściwościach, (iii) wytworzenie wybranych struktur, (iv) przeprowadzenie pomiarów ich właściwości, (v) wskazanie obszarów potencjalnego zastosowania.

W rozdziale 2 Autor opisał metamateriały hiperboliczne, czyli ośrodki, dla których wektory falowe przy ustalonej częstotliwości tworzą hiperboloidę (hiperboloidę dwupowłokową dla metamateriałów typu I oraz hiperboloidę jednopowłokową dla metamateriałów typu II). Omówił także sposób projektowania metamateriałów, który pozwala uzyskać takie właściwości oraz metody ich wytwarzania. Szczególną uwagę mgr inż. Alessandro Pianelli zwrócił na przejściowe zakresy częstotliwości, dla których wybrane składowe tensora przenikalności elektrycznej przyjmują wartości bliskie zeru. Autor wymienił także potencjalne zastosowania związane z tymi zakresami częstotliwości: (i) wzmocnienie emisji spontanicznej, (ii) powierzchniowo wzmocnioną spektroskopię ramanowską, (iii) uzyskiwanie rozdzielczość podfalowej, (iv) czujniki o zwiększonej czułości, (v) nieliniowe modyfikacje właściwości, (vi) przestrajanie reżimów dyspersji.

Rozdział 3 zawiera opis technik pomiarowych wykorzystywanych do charakteryzowania właściwości wytworzonych metamateriałów hiperbolicznych: metody zliczania pojedynczych fotonów skorelowanych czasowo (wykorzystywanej do pomiaru krzywych zaniku fluorescencji) oraz spektroskopii absorpcji przejściowej (wykorzystywanej do pomiaru ultraszybkiej odpowiedzi metamateriałów hiperbolicznych).

Kolejne dwa rozdziały przedstawiają oryginalne wyniki uzyskane przez mgr inż. Alessandro Pianelliego w ramach rozwiązywania zdefiniowanego problemu naukowego. Rozdział 4 rozpoczyna opis hiperbolicznego metamateriału zbudowanego z 20-nm warstw Ag/TiO<sub>2</sub>, który został zaprojektowany i wytworzony przez Autora. Przeprowadzone pomiary, których wyniki zestawiono w tabeli 4.1, wykazały kilkukrotne (od 2 do 6 razy) zwiększenie efektywności emisji spontanicznej barwnika kumaryny umieszczonego na warstwie metamateriału, w odniesieniu do emisji kumaryny umieszczonej na szkle. Podobny wzrost zaobserwowano także dla rozproszenia Ramana związanego z modami oscylacyjnymi rodminy R6G (tabela 4.2).

W dalszej części rozdziału 4 Autor opisał inny metamateriał, który składa się z warstw TiN oraz ITO, o grubościach 15 nm oraz 30 nm. Materiał ten wykazuje przenikalność

elektryczną bliską zeru w dwóch zakresach spektralnych: 0,55–0,65  $\mu\text{m}$  oraz 1,3–1,45  $\mu\text{m}$ . Ponadto, zaprojektowany metamateriał jest kompatybilny ze strukturami wytwarzanymi w technologii CMOS. Kluczowym wynikiem dotyczącym tej struktury, jest możliwość ultraszybkiego przełączania jej właściwości potwierdzona spektroskopią absorpcji przejściowej. W zakresie widzialnym odnotowano czasy przełączania 100 fs oraz 190 fs (dla włączania i wyłączania), w zakresie podczerwieni zmierzono czasy przełączania 140 fs oraz 300 fs (dla włączania i wyłączania). Ten rekordowy wynik otwiera drogę do konstrukcji ultraszybkich przełączników optycznych pracujących z częstotliwością modulacji 2–3,5 THz.

W końcowej części rozdziału 4 przedstawione są wyniki symulacji pokazujące kolimację światła przez przestrajalny metamateriał hiperboliczny. Rozważany metamateriał składa się z warstw ITO oraz  $\text{SiO}_2$  o grubościach 20 nm. Kontrolowanie długości fali, dla której metamateriał ma zerową przenikalność elektryczną odbywa się przez zmianę koncentracji nośników w warstwach ITO. Pokazano zmianę długości fali, która pozwala uzyskać przestrajalną kolimację światła w zakresie 1,57–2,74  $\mu\text{m}$ .

Rozdział 5 prezentuje wyniki badań nad metamateriałami hiperbolicznymi wykorzystującym w swojej strukturze warstwy grafenowe. W szczególności Autor pokazał, że właściwości metamateriału składającego się z przeplatających się warstw grafenu (o grubościach w zakresie 0,35–2,1 nm) oraz  $\text{SiO}_2$  (o grubości 100 nm) można kształtować zmieniając liczbę warstw oraz przestajać w szerokim zakresie spektralnym przykładając zewnętrzny potencjał. Wyniki zaprezentowane w początkowej części Rozdziału 5 zostały opublikowane w artykule [1], którego pierwszym autorem jest mgr inż. Alessandro Piannelli. Ponadto, rozdział 5 prezentuje wyniki symulacji w innych strukturach zawierających warstwy grafenu o grubości 2,1 nm oraz warstwy  $\text{SiO}_2$  o grubości 200 nm, a także o zmiennej grubości  $\text{SiO}_2$ , które były opublikowane w artykule [3] (mgr inż. Alessandro Pianelli jest trzecim autorem pracy, a jego udział polegał na wsparciu przygotowania manuskryptu).

W dalszej części rozdziału 5 zaprezentowane są wyniki dotyczące wielowarstwowych struktur grafen/ $\text{SiO}_2$  o różnych grubościach, które wykazują wyjątkową właściwość przestrajalnej kolimacji światła. Ponadto, tego typu metamateriał hiperboliczny może być wykorzystany jako modulator elektrooptyczny o częstotliwości przełączania 40 GHz dla długości fali 1,245  $\mu\text{m}$ . Wyniki te zostały opublikowane w pracy [2] (mgr inż. Alessandro Piannelli jest drugim autorem).

Rozprawę zamyka podsumowanie (Rozdział 6) eksponujące wszystkie osiągnięcia Autora. W mojej ocenie, mgr inż. Alessandro Pianelli osiągnął wszystkie deklarowane cele pracy. W rozprawie przedstawiono liczne struktury metamateriałów hiperbolicznych, które zostały opracowane na bazie odpowiednio dobranych materiałów. Część struktury została wytworzona, a ich właściwości były charakteryzowane eksperymentalnie. Dla każdego badanego materiału wskazano obszar jego potencjalnego zastosowania. Szczególnie obiecujące wydają się: (i) wykorzystanie metamateriałów hiperbolicznych do wzmacniania emisji spontanicznej oraz rozpraszania Ramana, (ii) wykorzystanie przestrajalnych metamateriałów hiperbolicznych w konstrukcjach ultraszybkich przełączników.

W mojej ocenie rozprawa stanowi spójny i przemyślany opis wyników uzyskanych przez Autora. Jakość naukowa rozprawy jest potwierdzona opublikowaniem części wyników w czasopiśmie naukowym o wysokim impact factor. Uważam, że uzupełnienie rozprawy o zestawienie parametrów (materiałów i wymiarów) wszystkich zaprojektowanych oraz wytworzonych struktur wraz ze wskazaniem ich wyjątkowych właściwości ułatwiłoby czytelnikowi docenienie istotności rozprawy. Prezentacja wyników zyskałaby także na wprowadzeniu następujących drobnych zmian:

- wyrównanie danych o różnej liczbie cyfr znaczących w tabeli 4.1,
- dodanie informacji o długościach fal na rys. 4.15, rys. E.2, oraz rys. E.3,
- uzupełnienie w dodatku B.1 definicji parametrów Psi oraz Delta.

Poniżej zebrałem zestawienie drobnych pomyłek, które nie obniżają wysokiej oceny merytorycznej pracy:

- w równaniach (3.1), (3.2) brakuje parametru  $t_0$  zdefiniowanego w tekście,
- brak komentarza w tekście do informacji o tysiącrotnym zwiększeniu wartości sygnału na rys. 4.7,
- błędna wartość grubości warstwy grafenu (str. 88: jest „35 nm” powinno być „0,35 nm”).

Największym zastrzeżeniem dotyczącym strony redakcyjnej pracy jest brak polskich znaków diakrytycznych w streszczeniu. Ponadto:

- wykaz skrótów i symboli powinien być uporządkowany alfabetycznie,
- błędne nawiasy w równaniu (2.25),
- nadmiarowe wcięcia (str. 37, 38, 62, 68, 77, 85, 87, 91, 101),
- pojedyncze błędne referencje (np. str. 61, jest „4.13” powinno być „4.8”; str. 117, jest „E.2” powinno być „E.1”)
- formatowanie referencji [97].

Zauważone niedociągnięcia językowe:

- powtarzający się błędny zapis nazwiska Charles’a Fabry’ego („Fabri” zamiast „Fabry”; strony v, vi, 8, 106, 107),
- powtarzający się błędny zapis słowa „dip” („deep” zamiast „dip”; strony: v, 33, 36, 62, 65, 107).

Inne błędy dotyczą zapisu słów:

- „switch on-ff” (str. iv),
- „slip-ring resonators” (str. 2),
- „milistone” (str. 3),
- „resent time” (str. 9),
- “wavevecor” (str. 13),
- “morover”(str. 51),
- “dinamics” (str. 59),

- “the fist ENZ” (str. 61),
- “colliamtion” (str. 76),
- “thikness” (str. 88).

**Podsumowując, rozprawa mgr. inż. Allesandro Piannelliego dokumentuje wiedzę w dyscyplinie. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że rozprawa prezentuje zarówno wyniki symulacyjne jak i eksperymentalne, co świadczy o szerokich kompetencjach Autora w zakresie metamateriałów hiperbolicznych. Przełomowe wyniki przedstawione w rozprawie bez wątpienia mają dużą wagę aplikacyjną i otwierają drogę do szeregu zastosowań. W związku z powyższym oceniam rozprawę pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

dr hab. inż. Karol Tarnowski, prof. uczelni

