



Uniwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

tel.: (22) 55 32 080

e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl

www.igf.fuw.edu.pl

Prof. dr hab. Tomasz Szoplik



Warszawa, 17 sierpnia 2022

**Recenzja
pracy doktorskiej**

"Wpływ dyspersji przestrzennej na właściwości optyczne pasywnych i aktywnych struktur fotonicznych utworzonych z metamateriałów hiperbolicznych"

mgr inż. Bartosza Janaszka

Praca powstała pod kierunkiem profesora Pawła Szczepańskiego w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej.

Przewód doktorski mgr inż. Bartosza Janaszka był otwarty przed dniem 30 kwietnia 2019 roku w zakresie dyscypliny **elektronika**. Według obecnie obowiązującej klasyfikacji niniejsza rozprawa ściśle mieści się w zakresie dyscypliny **automatyka, elektronika i elektrotechnika**.

Celem rozprawy Pana Janaszka jest analiza roli dyspersji przestrzennej, czyli zależności przenikalności elektrycznej od wektora falowego i od częstotliwości, w periodycznych nanostrukturach fotonicznych zbudowanych z planarnych metamateriałów hiperbolicznych. Autor dowodzi słuszności następujących trzech tez:

- dyspersja przestrzenna w planarnych metamateriałach hiperbolicznych w istotnym stopniu kształtuje ich właściwości optyczne i powinna być uwzględniana w procesie ich projektowania,
- dyspersja przestrzenna w planarnych metamateriałach hiperbolicznych może być kontrolowana przez dobór grubości warstwy dielektrycznej tworzącej komórkę elementarną struktury,
- dyspersja przestrzenna w planarnych metamateriałach hiperbolicznych może prowadzić do pojawienia się nowych efektów, niemożliwych do przewidzenia za pomocą *podejścia lokalnego*.

We Wstępie (str. 1-7) Autor rozprawy dobrze osadza ją w rozwijanym od 2011 roku nurcie badań nad wpływem powierzchniowych fal plazmonowo-polarytonowych w metamateriałach na ich kierunkowe właściwości transmisyjne, propagacyjne i filtracyjne zależne od częstotliwości i polaryzacji. Bibliografia zawiera 180 starannie dobranych pozycji, poczynając od klasycznych

prac Wiktora Veselago i Johna Pendry'ego a kończąc na wspólnej z promotorem pracy z roku 2022 [121] na temat generowania światła w zaproponowanym przez Autora laserze o rozproszonym sprzężeniu zwrotnym (DFB) na hiperkryształach fotonicznych.

Rozprawa zawiera wyniki opublikowane w latach 2016-2022 w 13 artykułach w czasopiśmie towarzystwa naukowego Optica (dawniej The Optical Society, a pierwotnie Amerykańskiego Towarzystwa Optycznego - OSA), w tym 2 w Applied Optics i 5 w Optics Express oraz 6 w pismach MDPI Crystals i Materials. Ponadto, wyniki Pana Janaszka i współautorów były przedstawione w 17 referatach na konferencjach międzynarodowych i krajowych, w tym organizowanych między innymi przez SPIE – The international society for optics and photonics oraz IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. W 8 artykułach i 15 artykułach pokonferencyjnych był pierwszym autorem. Ponieważ są to bardzo świeże prace, to trudno na razie mówić o ich cytowalności.

W drugim rozdziale rozprawy (str. 8-20) Autor przedstawia metody opisu propagacji fali elektromagnetycznej w metamateriałach.

Metoda skutecznego (efektywnego) opisu ośrodka niejednorodnego w przypadku *lokalnym* dotyczy metamateriału, którego komórka elementarna ma rozmiar mniejszy od długości fali rozpatrywanego promieniowania a dyspersja czasowa całej struktury jest zdefiniowana na podstawie funkcji przenikalności materiałów składowych, które w objętości komórki elementarnej mają stałe wartości. Pan Janaszek odwołuje się tutaj do współautorskiej pracy własnej [105] opublikowanej w Applied Optics w 2018 roku.

Pojęcie *opisu nielokalnego* wynika z konieczności odejścia od teorii ośrodków efektywnych, gdy nie jest możliwe uśrednienie przenikalności elektrycznej i magnetycznej w ośrodku niejednorodnym w skali nano i mikro. *Optyczna nielokalność* wynika z silnych zmian pola w objętości pojedynczej komórki elementarnej pochodzących od powierzchniowych fal plazmonowo-polarytonowych na granicach metalu i dielektryka w strukturach warstwowych czy też w sieciach nanodrutów lub macierzy nanocząstek zanurzonych w dielektrycznej matrycy. Metoda skutecznego opisu ośrodka niejednorodnego w przypadku nielokalnym dotyczy zależności dyspersji przestrzennej od długości wektora falowego $|\mathbf{k}|$ z uwzględnieniem poprawek proporcjonalnych do $|\mathbf{k}|^2$ oraz $|\mathbf{k}|^4$. Podkreślam z uznaniem, że Autor przedstawiając te poprawki odwołuje się do podstawowych wczesnych prac [108] J. Elser i inni w Appl. Phys. Lett. (2007), [109] A. V. Chebykin i inni w Phys. Rev. B (2012) oraz [111] R.-L. Chern w Opt. Express (2013). Uwzględnienie poprawek czwartego rzędu proporcjonalnych do $|\mathbf{k}|^4$ wprowadzonych przez Cherna pozwoliło Autorowi na przedstawienie w dalszej części rozprawy takich zjawisk jak przenikalność elektryczna bliska zero w metamateriale hiperbolicznym grafen/dwutlenek hafnu HfO_2 , niesymetryczna transmisja w metamateriale hiperbolicznym grafen/tlenek niobu Nb_2O_5 oraz akcji laserowej w hiperkryształach fotonicznych.

W dalszej części rozdziału drugiego została przedstawiona metoda macierzy przejścia (TMM – transfer matrix method) dla propagacji fali elektromagnetycznej przez anizotropową, planarną strukturę wielowarstwową.

Trzeci rozdział rozprawy (str. 21-70), zatytułowany podobnie jak cała praca, zawiera 4 podrozdziały, z których każdy wymaga osobnego omówienia.

Podrozdział 3.1 (str. 21-28) przedstawia wpływ dyspersji przestrzennej na kontrolowanie właściwości dyspersyjnych planarnych metamateriałów hiperbolicznych o ściśle periodycznej

strukturze. Teoretyczne rozważania dotyczą metamateriału hiperbolicznego, którego komórka elementarna zawiera monowarstwę grafenu nałożoną na przezroczystą nanowarstwę dielektryka dwutlenku hafnu HfO_2 o grubości od 0 do 150 nm.

W symulacjach Pan Janaszek uzyskał ciekawą klasyfikację typów dyspersji osobną dla polaryzacji światła TE i TM padającego pod kątami 0° , 45° i 75° . Przez typ dyspersji Autor rozumie kształt konturu dyspersji obserwowany w przestrzeni wektora falowego dla stałej częstotliwości.

Szczególnie ciekawe są mapy dyspersji w rozważanym hiperbolicznym metamateriale opisanym za pomocą nielokalnego, efektywnego modelu obliczone dla polaryzacji TM światła padającego pod kątami 0° , 45° i 75° . Dla tych kątów, gdy grubość warstwy dielektrycznej zmienia się od 25 do 200 nm a znormalizowana długość wektora falowego zmienia się od 1 do 5 umownych jednostek, uzyskuje się

- dyspersję eliptyczną, gdy składowe efektywnego nielokalnego tensora przenikalności elektrycznej są: $\text{Re}(\epsilon_{xx}^{\text{eff}}) > 1$ oraz $\text{Re}(\epsilon_{zz}^{\text{eff}}) > 1$,
- przenikalność elektryczną bliską zero, gdy $0 < \text{Re}(\epsilon_{xx}^{\text{eff}}) < 1$ lub $0 < \text{Re}(\epsilon_{zz}^{\text{eff}}) < 1$,
- I typ hiperboliczny, gdy $\text{Re}(\epsilon_{xx}^{\text{eff}}) > 0$ oraz $\text{Re}(\epsilon_{zz}^{\text{eff}}) < 0$,
- II typ hiperboliczny gdy $\text{Re}(\epsilon_{xx}^{\text{eff}}) < 0$ oraz $\text{Re}(\epsilon_{zz}^{\text{eff}}) > 0$.

Materiały z przenikalnością elektryczną bliską zero (epsilon-near-zero ENZ), a zatem niemal zerowym współczynnikiem załamania (zero index material ZIM), mają niespotykane w naturze własności optyczne: gdy $n = 0$ długość fali jest nieskończenie rozciągnięta i prędkość fazowa nieskończona. A to oznacza, że fala elektromagnetyczna oscyluje nie w przestrzeni ale w czasie z zachowaniem stałej fazy. Rozważany w pracy warstwowy metamateriał hiperboliczny zbudowany z monowarstw posiadającego własności plazmoneczne grafenu na nanowarstwach dielektrycznego dwutlenku hafnu HfO_2 jest moim zdaniem nierealizowalny w praktyce.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.1 zostały opublikowane w Optics Express we wspólnej z promotorem pracy z roku 2020 [117] i uogólniają wyniki przedstawione w współautorskiej pracy własnej [67] opublikowanej w tymże piśmie w 2016 roku dzięki poszerzeniu badanego zakresu pasm telekomunikacyjnych SCL, odpowiednio: 1460 nm – 1530 nm, 1530 – 1565 nm, 1565nm – 1675 nm do zakresu optycznego 0,4 – 2 μm .

Podrozdział 3.2 (str. 28-40) jest poświęcony teoretycznemu opisowi właściwości transmisyjno-odbiciowych metamateriałów hiperbolicznych w obecności silnej dyspersji przestrzennej. Tym razem planarny metamateriał hiperboliczny składa się 10 komórek elementarnych z monowarstwy grafenu o grubości 0,35 nm i 150 nm dielektrycznego azotku krzemu SiN osadzonych na podkładzie krzemowym. Światło pada na strukturę pod kątami od 0 do 90° a krzem stanowi ośrodek wyjściowy i obejmuje półprzestrzeń.

Symulacje komputerowe przedstawione w podrozdziale 3.2.1 wskazują, że przy silnej nielokalności dyspersji przestrzennej, dla światła czerwonego o długości fal $0,55 < \lambda < 0,6 \mu\text{m}$ pojawia się całkowite odbicie dla obu polaryzacji TM i TE. Ponadto, współczynniki transmitancji fal o $\lambda = 550 \text{ nm}$ i polaryzacji TM wykazują duże wartości dla dyskretnych kątów padania z przedziału $[-90^\circ, 90^\circ]$. Pan Janaszek sugeruje, że to zjawisko może być wykorzystane do filtracji przestrzennej.

Gdyby podobne rozważanie przeprowadzono dla opisanego w podrozdziale 3.1 hiperbolicznego metamateriału z przenikalnością elektryczną bliską zero otoczonego przestrzenią swobodną o współczynniku załamania $n = 1$, to Autor mógłby wykazać, że niezależnie od kąta padania światło opuszcza materiał ENZ prostopadle do powierzchni granicznej. Natomiast światło padające na materiał ENZ tylko normalnie do powierzchni w niego wnika, dla większych kątów zachodzi całkowite odbicie. Byłoby to jednak powtórzenie wyników pracy Li, Y. i inni, On-chip zero-index metamaterials w Nature Photonics 9, 738 (2015).

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.2.1 zostały opublikowane w współautorskiej pracy własnej [118] opublikowanej w Crystals w 2020 roku.

Podrozdział 3.2.2 jest poświęcony właściwościom optycznym metamateriału hiperbolicznego, który składa się 10 komórek elementarnych z monowarstwy grafenu o grubości 0,35 nm i 150 nm dielektrycznego tlenku niobu Nb_2O_5 osadzonych na podkładzie z selenku cynku ZnSe o $n = 2,5$. Światło pada na próbkę metamateriału pod kątami z przedziału ($0^\circ, 360^\circ$), czyli bezpośrednio na grafen i przez przezroczysty podkład.

Autor rozprawy stwierdził, że dla małych wartości wektora falowego $|k/k_0| < 1,4$ badana struktura może mieć dyspersję typu metalicznego dla polaryzacji TE ($\epsilon_{yy}^{\text{nlok}} < 0$) ale również hiperboliczną typu II dla polaryzacji TM gdy ($\epsilon_{xx}^{\text{nlok}} < 0$ oraz ($\epsilon_{zz}^{\text{nlok}} > 0$). Natomiast dla długości wektora falowego $|k/k_0| > 2,2$ światło o obu polaryzacjach TE i TM ma eliptyczną dyspersję dielektryczną. Ponadto, metamateriał hiperboliczny grafen/tlenek niobu Nb_2O_5 wykazuje asymetryczną transmisję promieniowania dla obu polaryzacji, to znaczy światło padające pod wszystkimi kątami na grafen jest odbijane a padające od strony podkładu ZnSe jest przepuszczane.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.2.2 zostały opublikowane w współautorskiej pracy własnej [119] opublikowanej w Materials w 2021 roku.

Podrozdział 3.3 (str. 40-55) przedstawia badanie właściwości propagacyjnych pojedynczego falowodu symetrycznego z rdzeniem z metamateriału hiperbolicznego i powietrznym płaszczem. Podobnie jak w poprzednich strukturach rdzeń jest opisany efektywnym tensorem przenikalności elektrycznej dla przypadku lokalnego danym przez wzory 1, 4 i 5 oraz wzorami 10, 11, 12 i 13 dla przypadku nielokalnego.

Szczegółowa analiza propagacji parzystych i nieparzystych modów TE i TM w falowodach o różnych trzech komórkach elementarnych związanych z różnymi grubościami dielektrycznego tlenku niobu Nb_2O_5 (80, 115 i 175 nm) prowadzi do ważnego wniosku. Otóż, silna dyspersja przestrzenna może prowadzić do pojawienia się dodatkowych gałęzi nielokalnych modów TE i TM o wysokiej stałej propagacji β , które dzięki ograniczeniu przestrzennemu mogą stanowić dodatkowy kanał transmisji sygnału optycznego. Mniej atrakcyjne są wnioski dotyczące możliwości zatrzymania modu TM o wysokiej stałej propagacji β lub silnego tłumienia modów dla określonego przedziału stałych propagacji.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.3 zostały opublikowane w współautorskiej pracy własnej [135] opublikowanej w Materials w 2021 roku.

Podrozdział 3.4 (str. 56-70) przedstawia model lasera z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym zrealizowanym w hiperkryształie fotonicznym, zaproponowanej w 2014 roku strukturze, która ma cechy zarówno kryształu fotonicznego (z fotoniczną przerwą energetyczną i zdolnością rozpraszania Bragga) jak i metamateriału hiperbolicznego (z kontrolowaną dyspersją przestrzenną).

W podrozdziale 3.4.2 Autor rozprawy przedstawia strukturę lasera, który nie ma rezonatora ograniczonego zwierciadłami, ale sekwencję 25 komórek elementarnych z planarnych warstw metamateriału hiperbolicznego złożonego z 2,5 nm AZO naprzemiennie ułożonych z dielektrykiem aktywnym ZnO o grubościach 5, 50, 100, 150 albo 200 nm. Emisja laserowa z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym zachodzi dzięki rozpraszaniu wstecznemu Bragga na strukturze okresowej ograniczonej po obu stronach warstwami dielektrycznego, domieszkowanego barwnikiem polistyrenu z optycznym wzmocnieniem optycznym, które tworzą rezonator Fabry-Perot.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.4.2 zostały opublikowane w *Materials* we wspólnych z promotorem pracach z lat 2021 i 2022 [120 i 121] i przedstawione na konferencji SPIE Metamaterials XIII [156].

W podrozdziale 3.4.3 mamy opis wpływu grubości warstwy dielektryka w wyżej wspomnianej komórce elementarnej na dyspersję metamateriału hiperbolicznego. Gdy ZnO ma grubości 5, 50 i 100 nm, to nielokalne tensory przenikalności elektrycznej odpowiadają dyspersji dielektrycznej dla polaryzacji TE i TM. Dla warstwy ZnO o grubości 150 nm otrzymuje się dyspersję hiperboliczną typu II dla polaryzacji TM (gdy $\text{Re}(\epsilon_{xx}^{\text{eff(nlok)}}) < 0$ oraz $\text{Re}(\epsilon_{zz}^{\text{eff(nlok)}}) > 0$) i dyspersję dielektryczną dla polaryzacji TE. Najgrubsza warstwa ZnO 200 nm przy silnej nielokalności dyspersji przestrzennej prowadzi do dyspersji z przenikalnością elektryczną bliską zero (epsilon-near-zero ENZ) dla polaryzacji TM i dyspersji metalicznej dla polaryzacji TE.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 3.4.3 zostały opublikowane w *Materials* we wspólnej z promotorem pracy w 2022 roku [121].

Czwarty rozdział rozprawy (str. 71-78) zawiera zespolone funkcje przenikalności elektrycznej materiałów stosowanych do konstrukcji planarnych metamateriałów hiperbolicznych. Zespolona funkcja przenikalności elektrycznej monowarstwy grafenu jest policzona dla fal z zakresu widzialnego i bliskiej poczerwieni (0,4 – 2 μm) na podstawie wzoru Kubo na przewodność. Parametry rezonansów plazmonowych w tlenku cynku domieszkowanym glinem (AZO - aluminum doped zinc oxide) policzono dla modelu Drude-Lorentza i podano zespoloną funkcję przenikalności elektrycznej AZO dla fal z zakresu 0,6 – 2 μm . Równania Sellmeiera Autor użył do policzenia części rzeczywistych funkcji przenikalności elektrycznej przezroczystego dwutlenku hafnu HfO_2 w zakresie 0,6 – 2 μm i przezroczystego azotku krzemu (powinno być Si_3N_4 a nie SiN [164]) w zakresie 0,5 – 1 μm . Zespoloną funkcję przenikalności elektrycznej tlenku niobu Nb_2O_5 dla fal z zakresu 0,4 – 2 μm podano przyjmując model dyspersyjny Tauc-Lorentza i opierając się na pracy [165] Gao i inni w *Opt. Express* (2012). Rzeczywiste funkcje przenikalności elektrycznej przezroczystych monotlenku cynku ZnO, selenku cynku ZnSe i polistyrenu PS w zakresie 0,5 – 1 μm wyznaczono korzystając z równania Sellmeiera.

W rozprawie zauważyłem kilka drobnych usterek redakcyjnych, które nie zmniejszają wartości rozprawy: na str. 3, drugi paragraf, 6 wiersz od góry, powinno być „przezroczyste tlenki przewodzące” a nie „tlenki przewodzące”; na str. 71, pod wzorem (82) napisano „gdzie $\omega = 2\pi c/\lambda$ oznacza pulsację fotonu o rozważanej długości fali λ ,”. Zamiast terminu „pulsacja fotonu” byłoby lepiej użyć określenia „częstotliwość fali elektromagnetycznej o długości fali λ .” Na str. 30 i 31, w podpisach Rys. 11b i 12b, na osiach rzędnych powinno być „Skł. nlok. tensora przenikalności [j. arb.]”

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Janaszka zatytułowana "Wpływ dyspersji przestrzennej na właściwości optyczne pasywnych i aktywnych struktur fonicznych utworzonych z metamateriałów hiperbolicznych" spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r. poz. 882).

Zatem rozprawa może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych w zakresie dyscypliny **elektronika** przed Radą Naukową Dyscypliny **Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika** Politechniki Warszawskiej. Proszę więc o dopuszczenie mgr inż. Bartosza Janaszka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę

- (i) precyzyjne omówienie tematyki badawczej,
- (ii) potwierdzenie postawionych tez,
- (iii) wysoką jakość merytoryczną rozprawy opartej na wynikach opublikowanych w dobrych czasopismach o międzynarodowym zasięgu i
- (iv) zaproponowanie nowego typu lasera z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym, który ma strukturę hiperkryształu fonicznego z metamateriałem hiperbolicznym

wnoszę o przyznanie Panu Bartoszowi Janaszki doktoratu z wyróżnieniem. Przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych pojawi się gdy materiały składowe metamateriałów hiperbolicznych zostaną dopasowane do możliwości osadzania nanowarstw w pracowniach nanotechnologicznych.

